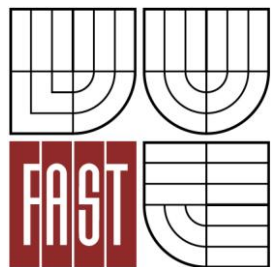




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

VÝVOJ POKROČILÝCH ZDICÍCH MATERIÁLŮ S INTEGROVANOU TEPELNOU IZOLACÍ

DEVELOPMENT OF ADVANCED MASONRY COMPONENTS WITH INTEGRATED THERMAL
INSULATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. IVO RUMEL

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. IVO RUMEL
Název	Vývoj pokročilých zdicích materiálů s integrovanou tepelnou izolací
Vedoucí diplomové práce	Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	27. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	V termínech určených časovým harmonogramem akademického roku, nejpozději do jednoho roku od data zadání diplomové práce
V Brně dne 27. 3. 2012	

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] Pytlík, P.: Cihlářství. - VUT Brno, CERM, s.r.o. Brno, 1995
- [2] Pytlík, P, Vlastnosti a užití stavebních výrobků, VUTIUM, Brno 1998
- [3] Matoušek, M., Lehké stavební látky II, SNTL, Praha 1985
- [4] Šťastník, S., ZACH, J., Stavební akustika a zvukoizolační materiály, CERM, Brno 2002
- [5] Šťastník, S., Zach, J., Zkoušení izolačních materiálů, CERM, Brno 2002

Zásady pro vypracování

Cílem práce bude vývoj tepelně izolačních tvarovek pro zděné konstrukce s integrovanou tepelnou izolací. Bude se jednat především o vývoj výplňového izolačního materiálu a technologie vyplňování dutin keramických tvarovek. Cílem bude dosažení optimálních tepelně izolačních a mechanických vlastností tvarovek, které by bylo možné využít pro výstavbu jednovrstvého obvodového pláště stavebních konstrukcí v nízkoenergetickém a pasivním standardu.

Předepsané přílohy

.....

Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje vývoji tepelně izolačních tvarovek pro zděné konstrukce s integrovanou tepelnou izolací. V teoretické části práce byly shrnuty legislativní předpisy pro stavební konstrukce, uvedeny technické požadavky na izolační a keramické výrobky. Dále zde byla popsána výroba hrubé keramiky a technologie plnění keramických tvarovek integrovanou izolací.

Praktická část diplomové práce se zabývala novými možnostmi vyplnění velkoobjemových dutin keramických tvarovek tepelnými izolanty na bázi polyuretanových pěn s cílem zlepšení jejich tepelně izolačních a také mechanických vlastností.

V závěru diplomové práce je provedeno celkové zhodnocení provedených měření, technologie vyplňování a srovnání nových tvarovek se současným trhem a jejich případné použití.

Klíčová slova

Keramická tvarovka, integrovaná tepelná izolace, výroba, technologie plnění

Abstract

The master's thesis is dedicated to the development of thermally insulating fittings for brick construction with integrated thermal insulation. In the theoretical part of the thesis are summarized legislative regulations for building construction, the technical requirements for insulation and ceramic products. Furthermore is here described the production of ceramics and technology of filling the ceramic fittings with interated insulation.

The practical part of the thesis deals with new possibilities of filling the bulk ceramic fittings with thermal insulating materials based on polyurethane foams in order to improve their thermal insulation and mechanical properties. In the conclusion of this master thesis is an overall evaluation of taken measurements, the filling technology and comparison of new fittings with the current market and their potential use.

Keywords

Ceramic block, integrated thermal insulation, technology filling

Bibliografická citace VŠKP

RUMEL, Ivo. *Vývoj pokročilých zdicích materiálů s integrovanou tepelnou izolací*. Brno, 2012. 87 s., 14 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jiří Zach, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2013

.....
podpis autora
Ivo Rumel

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jiřímu Zachovi, Ph.D., za vedení, poskytnuté rady a věnovaný čas při zpracování.

OBSAH

1	Úvod	11
2	TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1	Legislativa pro stavební materiály na území ČR.....	12
2.1.1	Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon), ve znění pozdějších předpisů	12
2.1.2	Vyhláška č. 268/2009 o technických požadavcích na stavby.....	13
2.1.2.1	Mechanická odolnost a stabilita	13
2.1.2.2	Požární bezpečnost.....	13
2.1.2.3	Všeobecné požadavky pro ochranu zdraví, zdravých životních podmínek a životního prostředí.....	14
2.1.2.4	Ochrana proti hluku a vibracím.....	14
2.1.2.5	Úspora energie a tepelná ochrana.....	14
2.1.3	Zákon č. 258/ 2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů	15
2.1.4	Zákon č. 102/2001 Sb., o obecné bezpečnosti výrobků a o změně některých zákonů (zákon o obecné bezpečnosti výrobků), ve znění pozdějších předpisů	15
2.1.5	Zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky, ve znění pozdějších předpisů	16
2.1.6	Nařízení vlády 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky	16
2.1.7	Vyhláška 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb	16
2.1.8	Zákon č. 406/ 2000 Sb., o hospodaření energií, ve znění pozdějších předpisů [13]	16
2.1.9	Vyhláška č. 148/2007 energetická náročnost budov	17
3	Požadavky a vlastnosti zdících materiálů	18
3.1	Požadavky tepelně izolační	18
3.1.1	Součinitel prostupu tepla	18
3.1.2	Tepelný odpor.....	19
3.1.2.1	Odpor konstrukce při prostupu tepla.....	19
3.1.3	Součinitel tepelné vodivosti.....	20
3.1.3.1	Vliv objemové hmotnosti	21
3.1.3.2	Vliv vlhkosti.....	21
3.1.4	Tepelná jímavost	22
3.2	Požadavky akustické.....	22
3.2.1	Vzduchová neprůzvučnost.....	23
3.2.2	Kročejová neprůzvučnost	23
3.3	Požadavky mechanické.....	23
3.4	Vzhled a geometrické požadavky keramických výrobků.....	25

4	Vývoj v oblasti zdících materiálů pro obvodové konstrukce	26
4.1	Zvýšení šířky tvarovky	27
4.2	Snížení tepelné vodivosti keramického střepu	27
4.3	Optimální geometrie tvarovek	28
4.3.1	Snížování tloušťky stěn žeber.....	28
4.4	Výplň dutin tvarovky pomocí tepelně izolačních materiálů.....	28
5	Technologie výroby pálených zdících prvků.....	29
5.1	Technologie vyplňování dutin keramických tvarovek	32
5.2	Plnění kusovými izolanty	33
5.2.1	Vertikální způsob vkládání.....	33
5.2.2	Horizontální způsob vkládání.....	36
5.3	Plnění partikulárními izolanty	38
5.3.1	Propařování EPS v malých dutinách	38
5.3.2	Ruční plnění malých dutin na stavbě.....	40
5.3.3	Vibrování a vytvrzování izolačního materiálu ve velkých dutinách	40
5.3.4	Vibrování a vytvrzování malých dutin	42
6	Materiály vhodné pro integrovanou izolaci.....	43
6.1	Minerální vlna	43
6.2	Polyuretanová izolační pěna (PUR/PIR)	43
6.3	Pěnový polystyren EPS	44
6.4	Expandovaný perlit.....	46
7	PRAKTICKÁ ČÁST	47
7.1	Metodika řešení	47
7.1.1	Prováděné zkoušky a měření	49
7.1.2	Stanovení tloušťky.....	50
7.1.3	Stanovení lineárních rozměrů.....	50
7.1.4	Stanovení objemové hmotnosti	50
7.1.5	Stanovení součinitele tepelné vodivosti (ČSN EN 12667).....	51
7.1.6	Stanovení pevnosti v tlaku tepelněizolačních výrobků	51
7.1.7	Stanovení dlouhodobé nasákavosti při úplném ponoření	52
7.1.8	Stanovení pevnosti v tlaku u cihelných bloků	53
7.1.9	Stanovení rozměrů cihelných bloků	54
7.1.10	Stanovení sypné hmotnosti	54
7.1.11	Stanovení tepelných vlastností	54
7.2	Zkušební vzorky	55
7.3	Práce s trubičkovými PUR pěnama.....	57
7.3.1	Popis použitých trubičkových polyuretanových pěn.....	57

7.3.2	Vyplňování forem PUR pěny	58
7.3.3	Vyplňování dutin tvarovek	59
7.3.4	Stanovení tloušťky, lineárních rozměrů a objemové hmotnosti	60
7.3.5	Stanovení součinitele tepelné vodivosti	63
7.3.6	Stanovení pevnosti v tlaku tepelněizolačních materiálů při 10 % deformaci	65
7.3.7	Stanovení dlouhodobé nasákavosti	67
7.3.8	Stanovení mechanických vlastností tvarovek	68
7.3.9	Stanovení tepelných vlastností tvarovek	70
7.3.10	Stanovení ceny potřebné k vyplnění tvarovky	72
7.4	Práce se sypkou směsí PUR granulátu a polystyrenu EPS	74
7.4.1	Popis disperzního lepidla	74
7.4.2	Plnění sypké směsi do formy	74
7.4.3	Plnění směsi do keramických dutin	75
7.4.4	Stanovení sypké hmotnosti	76
7.4.5	Stanovení tloušťky, rozměrů a objemové hmotnosti	76
7.4.6	Stanovení součinitele tepelné vodivosti	77
7.4.7	Stanovení tepelných vlastností tvarovek	77
8	Závěr	79
	POUŽITÁ LITERATURA	82
	Seznam tabulek	85
	Seznam obrázků	86
	Seznam grafů	87
	Seznam zkratk	87
	Seznam příloh	87

1 Úvod

Cihla – nejstarší umělé stavivo – doprovází člověka už tisíce let. Má tak tedy za sebou dlouhý vývoj, který se v důsledku stále stoupajících požadavků na stavební materiály v posledních dvou stoletích velmi výrazně zrychlil. Základem veškerých inovací je stále kvalitní vstupní surovina – cihlářská hlína. Díky moderním technologiím ale už dávno cihla není výrobkem zhotovovaným na úrovni jednotlivých řemeslných postupů, kdy teploty sušení a výpalu značně kolísaly, vnitřní struktura výrobků byla značně nerovnoměrná a proměnlivost hotových výrobků byla velká.

V současné době je cihla produktem automatizovaného, průběžně kontrolovaného výrobního procesu, který zajišťuje rozptyl konečných vlastností v úzkých tolerancích, jejichž dodržování je garantováno důsledným systémem kontroly výroby. Posledním stupněm vývoje cihlářských výrobků jsou cihlové systémy, jejichž pilířem je obvykle cihelná tvarovka typu THERM. Tato tvarovka využívá jako základ tisíci lety ověřené vlastnosti cihelného střepe a svou moderní konstrukcí (speciálními tvary otvorů, vylehčením hmoty drobnými póry, zámkovým systémem zazubení, velikost tvarovky atd.) spolehlivě splňují současné, často protichůdné požadavky na stavební dílo (tepelný odpor, pevnost, zdravé mikroklima, akumulace tepla, difuze vodních par atd.) [1]. V dnešní době, kdy je stále větší důraz kladen na konstrukční prvky a systémy z hlediska co nejnižších energetických ztrát, trvanlivosti, a ochrany životního prostředí, nastal velký rozvoj především v oblasti materiálového výzkumu a inženýrství. Největší požadavky jsou kladeny na tepelně izolační vlastnosti cihlářských produktů [2].

Současným trendem ve stavebním průmyslu je snaha vyvíjet nové nebo modifikovat běžné stavební materiály s nejlepšími tepelně izolačními schopnostmi pro dosažení nejvyšších energetických úspor. Vývoj se týká téměř všech skupin stavebních materiálů: tepelných izolací, omítek i nosných materiálů [3]. V nedávné době se na trhu objevily děrované cihly s dutinami vyplněnými různými tepelně izolačními materiály.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Legislativa pro stavební materiály na území ČR

Na úvod diplomové práce se v této kapitole budeme zabývat výčtem platných legislativním předpisům České republiky, které se vztahují obecně na oblast stavebních konstrukcí a materiálů. Z pohledu zaměření diplomové práce se jeví níže uvedené jako nejdůležitější legislativní předpisy pro tepelně izolační a keramické výrobky. V těchto legislativních předpisech jsou uvedeny technické požadavky na stavby, konstrukce i samotné stavební materiály, technické požadavky na výrobky, požární ochrana staveb a je zde také zmíněna energetická náročnost budov.

Základními předpisy jsou jednotlivé zákony, jejichž obecné znění je dále specifikováno v souvisejících vyhláškách, případně nařízeních vlády. Konkrétní technické požadavky na výrobky obvykle nalezneme v příslušných technických normách. Jejich dodržování je pouze doporučeno, pokud se však na jejich znění odkazují příslušné zákony, vyhlášky či nařízení vlády, získávají statut těchto předpisů, tedy stávají se závaznými.

Zmíněné normy nazýváme normami požadavkovými. Normy výrobkové jsou závazné například při výrobkové certifikaci. Dále specifikují požadavky na výrobky, upřesňují jejich specifické vlastnosti, označování jednotlivých parametrů apod. Posledním typem jsou normy zkušební, ve kterých nalezneme postup pro stanovování jednotlivých vlastností stavebních materiálů [4].

2.1.1 Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon), ve znění pozdějších předpisů [5]

Stavební zákon byl v roce 2012 novelizován zákonem 167/2012 Sb. V odstavci § 156 **požadavky na stavby** tohoto zákona jsou uvedena kritéria, která říkají, že pro stavbu mohou být navrženy a použity jen takové výrobky, materiály a konstrukce, jejichž vlastnosti z hlediska způsobilosti stavby pro navržený účel zaručují, že stavba při správném provedení a běžné údržbě po dobu předpokládané existence splní požadavky uvedené v prováděcím předpisu zákona, jímž je vyhláška 268/2009 Sb. (tyto požadavky jsou uvedeny v odstavci 0 níže).

2.1.2 Vyhláška č. 268/2009 o technických požadavcích na stavby [7]

Základní požadavky jsou specifikovány v § 8, je zde napsáno, že stavba musí být navržena a provedena tak, aby byla při respektování hospodárnosti vhodná pro určené využití a aby současně splnila základní požadavky, kterými jsou mechanická odolnost a stabilita, požární bezpečnost, ochrana zdraví osob a zvířat, zdravých životních podmínek a životního prostředí, ochrana proti hluku, bezpečnost při užívání, úspora energie a tepelná ochrana.

2.1.2.1 Mechanická odolnost a stabilita

Podle odstavce §9 musí být stavba navržena a provedena v souladu s normovými hodnotami tak, aby účinky zatížení a nepříznivé vlivy prostředí, kterým je vystavena během výstavby a užívání při řádně prováděné běžné údržbě, nemohly způsobit například:

- náhlé nebo postupné zřícení, popřípadě jiné destruktivní poškození kterékoliv její části nebo přilehlé stavby;
- nepřipustné přetvoření nebo kmitání konstrukce, které může narušit stabilitu stavby, mechanickou odolnost a funkční způsobilost stavby nebo její části, nebo které vede ke snížení trvanlivosti stavby;
- poškození nebo ohrožení provozuschopnosti připojených technických zařízení v důsledku deformace nosné konstrukce.

Stavební konstrukce a stavební prvky musí být navrženy a provedeny v souladu s normovými hodnotami tak, aby po dobu plánované životnosti stavby vyhověly požadovanému účelu a odolaly všem účinkům zatížení a nepříznivým vlivům prostředí, a to i předvídatelným mimořádným zatížením, která se mohou běžně vyskytnout při provádění i užívání stavby.

2.1.2.2 Požární bezpečnost

Stavba musí být navržena a postavena takovým způsobem, aby v případě požáru:

- byla po určitou dobu zachována nosnost a stabilita konstrukce;
- byl omezen rozvoj a šíření požáru a kouře ve stavebním objektu;
- bylo omezeno šíření požáru na sousední objekty;

- mohly osoby a evakuovaná zvířata opustit stavbu, nebo být zachráněny jiným způsobem;
- byla brána v úvahu bezpečnost záchranných jednotek[6].

2.1.2.3 Všeobecné požadavky pro ochranu zdraví, zdravých životních podmínek a životního prostředí

Tento odstavec § 10 pojednává o tom, že stavba musí být navržena a provedena tak, aby neohrožovala život a zdraví osob nebo zvířat, bezpečnost, zdravé životní podmínky jejich uživatelů ani uživatelů okolních staveb a aby neohrožovala životní prostředí nad limity obsažené v jiných právních předpisech, zejména následkem:

- uvolňování látek nebezpečných pro zdraví a životy osob a zvířat a pro rostliny;
- přítomnosti nebezpečných částic v ovzduší;
- znečištění vzduchu, povrchových nebo podzemních vod a půdy;
- výskytu vlhkosti ve stavebních konstrukcích nebo na povrchu stavebních konstrukcí uvnitř staveb;
- nedostatečných tepelně izolačních a zvukoizolačních vlastností podle charakteru užívaných místností.

2.1.2.4 Ochrana proti hluku a vibracím

Obecné požadavky týkající se ochrany proti hluku a vibracím jsou uvedeny v § 14. Stavba musí zajišťovat, aby hluk a vibrace působící na osoby a zvířata byly na takové úrovni, které neohrožují zdraví, zaručí noční klid a je vyhovující pro prostředí s pobytem osob nebo zvířat, a to i na sousedících pozemcích a stavbách.

Při zajišťování ochrany staveb proti vnějšímu hluku, zejména od dopravy, se musí přednostně uplatňovat opatření [...] chránícími jednotlivé stavby tak, aby byly splněny podmínky pro ochranu hluku v chráněném venkovním prostoru, chráněném venkovním prostoru staveb a chráněném vnitřním prostoru staveb.

2.1.2.5 Úspora energie a tepelná ochrana

V § 16 je zmínka o tom, jak musí být budovy navrženy a provedeny tak, aby spotřeba energie na jejich vytápění, větrání, umělé osvětlení, popřípadě klimatizaci byla co nejnižší. Energetickou náročnost je třeba ovlivňovat tvarem budovy, jejím dispozičním řešením,

orientací a velikostí výplní otvorů, použitými materiály a výrobky a systémy technického zařízení budov. Při návrhu stavby se musí respektovat klimatické podmínky lokality.

Budovy s požadovaným stavem vnitřního prostředí musí být navrženy a provedeny tak, aby byly dlouhodobě po dobu jejich užívání zaručeny požadavky na jejich tepelnou ochranu splňující tepelnou pohodu uživatelů, požadované tepelně technické vlastnosti konstrukcí budov, tepelně vlhkostní podmínky technologií podle různých účelů budov, nízkou energetickou náročností budov.

2.1.3 Zákon č. 258/ 2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů [8]

V tomto zákoně zejména v § 30 jsou definovány pojmy hluk a vibrace, kdy hlukem se rozumí zvuk, který může být škodlivý pro zdraví a jehož hygienický limit stanoví prováděcí právní předpis. Vibracemi se rozumí vibrace přenášená pevnými tělesy na lidské tělo, které mohou být škodlivé pro zdraví a jejichž hygienický limit stanoví prováděcí právní předpis.

V § 34 noční dobou se pro účely kontroly dodržení povinností v ochraně před hlukem a vibracemi rozumí doba mezi 22.00 a 6.00 hodinou.

Osoba je při podnikatelské činnosti povinna podle § 76 doložit, že výrobky, které vyrábí, dováží nebo uvádí na trh nebo do oběhu a které mají být [...] schváleny orgánem ochrany veřejného zdraví, byly schváleny.

Orgány ochrany veřejného zdraví tvoří na celostátní úrovni zejména Ministerstvo zdravotnictví, na regionální úrovni jsou to krajské hygienické stanice. Co se týče ochrany proti hluku, některé povinnosti a pravomoci orgánů ochrany veřejného zdraví přechází také na Ministerstvo obrany, vnitra, pro místní rozvoj, ministerstvo životního prostředí a také krajské úřady [4].

2.1.4 Zákon č. 102/2001 Sb., o obecné bezpečnosti výrobků a o změně některých zákonů (zákon o obecné bezpečnosti výrobků), ve znění pozdějších předpisů [9]

V tomto uvedeném zákoně je vymezen pojem výrobek podle § 2. Výrobkem [...] je jakákoliv movitá věc, která byla vyrobena vytěžena nebo jinak získána bez ohledu na stupeň jejího zpracování a je určena k nabídce spotřebiteli nebo lze rozumně předvídat, že bude užívána spotřebiteli, včetně věci poskytnuté v rámci služby, a to i v případě, že nebyla určena k nabídce spotřebiteli, pokud je tato věc dodávána v rámci podnikatelské činnosti úplatně nebo bezúplatně, a to jako věc nová nebo použitá či upravená.

V § 3 - obecné požadavky na bezpečnost výrobku se hovoří o tom, že bezpečným výrobkem je výrobek, který za běžných nebo rozumně předvídatelných podmínek užití nepředstavuje po dobu stanovenou výrobcem nebo po dobu obvyklé použitelnosti nebezpečí, nebo jehož užití představuje pro spotřebitele vzhledem k bezpečnosti a ochraně zdraví pouze minimální nebezpečí při užívání výrobku [...].

2.1.5 Zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky, ve znění pozdějších předpisů [10]

V § 2 jsou vymezeny technické požadavky na výrobek. Technická specifikace obsažená v právním předpisu, technickém dokumentu nebo technické normě, která stanoví požadované charakteristiky výrobku, jakými jsou úroveň jakosti, užité vlastnosti, bezpečnost a rozměry, včetně požadavků na jeho název, pod kterým je prodáván, úpravu názvosloví, symbolů, zkoušení výrobku a zkušebních metod, požadavky na balení, označování výrobku.

2.1.6 Nařízení vlády 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky [11]

Stavebním výrobkem je každý výrobek určený výrobcem nebo dovozcem pro trvalé zabudování do staveb [...], kdy trvalým zabudováním výrobku do stavby je takové zabudování, při kterém se vyjmutím nebo výměnou výrobku trvale mění vlastnosti stavby, přičemž vyjmutí nebo výměna výrobku je stavební prací

2.1.7 Vyhláška 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb [12]

Z této vyhlášky je docela důležité uvést § 6 - reakce na oheň, kde se píše, že reakce stavební konstrukce včetně stavebního výrobku určeného k zabudování do stavby na oheň musí být klasifikována do tříd A až F včetně přiřazených indexů podle české technické normy ČSN EN 13 501 -1.

2.1.8 Zákon č. 406/ 2000 Sb., o hospodaření energií, ve znění pozdějších předpisů [13]

Zákon o hospodaření energií byl novelizován zákonem č. 318/2012 Sb. Je to zatím poslední, ale zásadní novela zákona č. 406/2000 Sb. Tato novela vejde v platnost od 1. ledna 2013. V tomto zákoně se mimo jiné hovoří o nově definované skutečnosti týkající se průkazu energetické náročnosti budov, které jsou zmíněny v § 6 - stavebník nebo vlastník zařízení na distribuci tepelné energie a vnitřní distribuce tepelné energie [...] je povinen u nově

zřizovaných zařízení a u zařízení, u nichž se provádí změna dokončené stavby [...] zajistit účinnost užití rozvodů energie a vybavení vnějších rozvodů a vnitřních rozvodů tepelné energie a chladu v rozsahu stanoveném prováděcím právním předpisem.

§ 7 - snižování energetické náročnosti budov. Je zde uvedeno, že v případě výstavby nové budovy je stavebník povinen plnit požadavky na energetickou náročnost budovy podle prováděcího právního předpisu [...] nebo v případě větší změny dokončené budovy jsou stavebník, vlastník budovy nebo společenství vlastníků povinni plnit požadavky na energetickou náročnost budovy podle prováděcího právního předpisu a jsou zároveň povinni při podání žádosti o stavební povolení nebo ohlášení stavby nebo před zahájením větší změny dokončení budovy doložit průkazem energetické náročnosti budovy.

§ 7a – průkaz energetické náročnosti – stavebník, vlastník budovy nebo společenství vlastníků jednotek je povinen zajistit zpracování průkazu energetické náročnosti při výstavbě nových nebo při větších změnách dokončených budov, Zajistit zpracování průkazu pro užívané bytové domy nebo administrativní budovy (to znamená pro objekty již stojící bez ohledu na to, zda na nich jsou nebo nejsou prováděny změny).

- s celkovou energeticky vtažnou plochou větší než 1500 m² do 1. ledna 2015;
- s celkovou energeticky vztažnou plochou větší než 1000 m² do 1. ledna 2017;
- s celkovou energeticky vztažnou plochou menší než 1000 m² do 1. ledna 2019.

2.1.9 Vyhláška č. 148/2007 energetická náročnost budov [14]

Podle § 3 - požadavky na energetickou náročnost budovy jsou splněny, je-li energetická náročnost hodnocené budovy stanovená metodou podle § 5 nižší než energetická náročnost referenční budovy při dodržení obecných technických požadavků na výstavbu.

Zmiňovaná § 5 kde se obecně hovoří o metodě stanovení energetické náročnosti budovy, která se stanovuje výpočtem celkové roční dodané energie v GJ potřebné na vytápění, větrání, chlazení, klimatizaci, přípravu teplé vody a osvětlení při jejím standardizovaném užívání bilančním hodnocením.

Bilanční hodnocení se provádí intervalovou výpočtovou metodou nejlépe s měsíčním obdobím. Pro budovy s nízkou tepelnou setrvačností se může použít intervalová výpočtová metoda hodinová, nebo s ještě kratším časovým intervalem, s odlišnými podrobnostmi metod výpočtu a vstupních údajů.

Celková roční dodaná energie se při bilančním hodnocení stanoví jako součet jednotlivých vypočtených dílčích spotřeb dodané energie pro všechny časové intervaly v roce a pro všechny vytápěné, chlazené, větrané či klimatizované zóny budovy.

Pro vzájemné porovnání energetické náročnosti budov stejného typu se stanovuje měrná roční spotřeba energie budovy, vyjádřená poměrem celkové roční dodané energie na jednotku celkové podlahové plochy budovy v kWh/m².

§ 6 - průkaz energetické náročnosti budovy tvoří protokol prokazující energetickou náročnost budovy a grafické znázornění energetické náročnosti budovy [...]. Schéma klasifikace energetické náročnosti budovy obsahuje klasifikační třídy A až G a jejich hranice.

3 Požadavky a vlastnosti zdících materiálů

Po uvedení technických předpisů v předchozí kapitole můžeme poukázat na vlastnosti, které od zdících prvků společně s izolačními materiály budeme požadovat. Kromě základních požadavků na hygienickou nezávadnost a požární bezpečnost jsou to zejména tepelně izolační, akustické a také mechanické požadavky.

3.1 Požadavky tepelně izolační

Požadavky na tepelně technické vlastnosti stavebních konstrukcí jsou uvedeny v normě ČSN 73 0540 - 2 [34]. V této zmíněné normě jsou uvedeny jednak hodnoty požadované, které zajišťují minimální tepelně technické vlastnosti konstrukce z hlediska její bezproblémové funkčnosti při užívání, a dále hodnoty doporučené pro součinitel prostupu tepla U_N [W.m⁻².K⁻¹] uvedeny v příloze 1. Použití doporučených hodnot se doporučuje všude tam, kde tomu nebrání technické, ekonomické nebo legislativní překážky.

3.1.1 Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla U_T [W.m⁻².K⁻¹] je definován jako celková výměna tepla v ustáleném stavu mezi dvěma prostředím vzájemně oddělenými stavební konstrukcí o tepelném odporu R s přilehlými mezními vzduchovými vrstvami [33].

$$U_T = \frac{1}{R_T}$$

kde: R_T ... odpor konstrukce při prostupu tepla (u prostředí do prostředí)[m².K¹.W⁻¹][33].

Zdivo tloušťky 440 mm dosahuje součinitele prostupu tepla v rozmezí hodnot $U = 0,10 - 0,21 \text{ [W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}\text{]}$. Tepelné vazby v místě rohů a napojení výplní otvorů jsou řešeny pomocí doplňkových cihel, takže je možné eliminovat vznik tepelných mostů v těchto detailech. Je jasné, že z pohledu požadavků na zvýšení tepelného odporu zdiva se nevyvíjel pouze tvar cihel, ale i samotný keramický střep, spojovací malta a také omítky. Zároveň je nutné uvědomit si i to, že s novými materiály se mění také pracovní postupy zdění a zvyšuje se produktivita práce [22].

3.1.2 Tepelný odpor

Pokud známe hodnotu součinitele tepelné vodivosti vrstvy materiálu a je-li konstantní, povrchy kolmé na směr tepelného toku jsou vzájemně rovnoběžné a vrstvou tak proudí rovnoměrný tepelný tok. Tepelný odpor $R \text{ [m}^2\text{.K}^1\text{.W}^{-1}\text{]}$ je definován vztahem:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

kde: d ... tloušťka vrstvy, tloušťka vrstvy v konstrukci [m];

λ ... součinitel tepelné vodivosti $\text{[W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ [33].

3.1.2.1 Odpor konstrukce při prostupu tepla

Jedná se o úhrnný tepelný odpor bránící výměně tepla mezi prostředím oddělenými od sebe stavební konstrukcí o tepelném odporu $R_T \text{ [m}^2\text{.K}^1\text{.W}^{-1}\text{]}$ s přilehlými mezními vzduchovými vrstvami, je definován vztahem:

$$R_T = R_{si} + R + R_{se}$$

kde: R_{si} ... odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce $\text{[m}^2\text{.K}^1\text{.W}^{-1}\text{]}$;

R ... odpor konstrukce $\text{[m}^2\text{.K}^1\text{.W}^{-1}\text{]}$;

R_{se} ... odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce $\text{[m}^2\text{.K}^1\text{.W}^{-1}\text{]}$ [33].

3.1.3 Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] je definován jako schopnost stejnorodého, isotropního materiálu vést teplo [33]. Udává, kolik tepla přeneseme 1m^2 materiálu do vzdálenosti 1m při teplotním rozdílu 1K . Součinitel tepelné vodivosti je základní tepelnou hodnotou, vlastností stavebních materiálů a výrobků. Je závislý zejména na objemové hmotnosti a vlhkosti. U pálených a silikátových materiálů obvykle platí, že se zvyšující se vlhkostí a objemovou hmotností v suchém stavu se zvyšuje hodnota tepelné vodivosti [19].

Pro zvýšení tepelněizolačních vlastností materiálů je výhodnější větší množství malých pórů oproti velkým. Anizotropní materiály mají v jednotlivých směrech různé hodnoty součinitele tepelné vodivosti [15].

Hodnota součinitele tepelné vodivosti se určuje experimentálně a závisí na mnoha vnitřních i vnějších faktorech:

- vnitřní faktory:
 - objemová hmotnost;
 - druhu, velikosti a rozdělení pórů v látce;
 - mineralogické a chemické složení;
- vnější faktory:
 - vlhkost;
 - teplota;
 - tlak [20].

Měření součinitele tepelné vodivosti lze provádět různými způsoby a metodami. V zásadě lze metody měření rozdělit na:

- **Stacionární** – měření v ustáleném stavu, kdy tepelný výkon je v průběhu zkoušky stálý. K těmto metodám patří např. metoda válce dle ČSN 72 7011, metoda koule ČSN 72 7013 a nejpoužívanější v praxi je metoda desky uvedená v ČSN 72 7012, rozděluje se dále na metodu **chráněné teplé desky** uvedené v ČSN 72 7012 - 2, ČSN EN 12667, ISO 8301 a na metodu **měřidla tepelného toku** ČSN 73 7012 - 3, ČSN 72 7012-3, ČSN EN 12667 a ČSN EN 12939, ISO 8302.

- **Nestacionární** – měření ve stavu neustáleném, kdy tepelný výkon se během doby měření mění [15]. Jedná se zejména o metodu nestacionárního tepelného toku (ČSN EN 72 1105) a metodu topného drátu (ČSN EN ISO 8894-1).

3.1.3.1 Vliv objemové hmotnosti

Většina stavebních látek je složena ze základní látky a vzduchu, který se nachází v pórech látky a má vliv na součinitel tepelné vodivosti. Je totiž známo, že tepelná vodivost vzduchu v pórové struktuře má mnohem nižší hodnotu než je hodnota součinitele tepelné vodivosti keramické kostry.

Z toho plyne, že srovnáváme-li dva různé materiály z téže látky, které mají různé objemové hmotnosti, pak vyšší tepelně izolační schopnost (nižší součinitel tepelné vodivosti) má materiál s nižší objemovou hmotností [20]. Například pro pálené cihly je hodnota součinitele tepelné vodivosti střepe ve vysušeném stavu při teplotě 10°C jako $\lambda_{10,dry}$ uvedena v normě ČSN EN 1745.

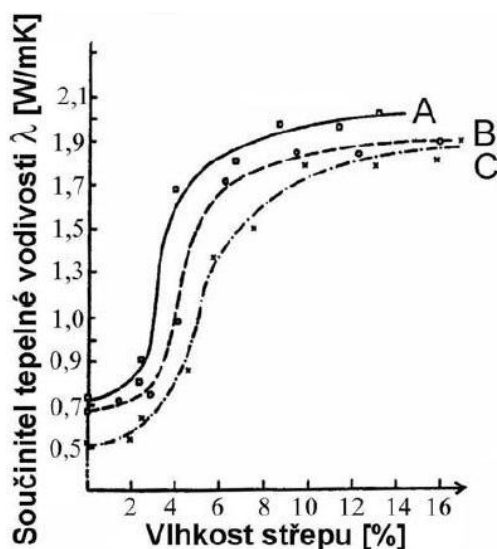
<i>objemová hmotnost</i> [kg.m ⁻³]	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,2	0,26	0,34	0,41	0,49	0,58	0,67	0,77

Tabulka 1: Součinitel tepelné vodivosti pálených cihel v závislosti na objem. hmotnosti [20]

Pokud se nyní zaměříme na objemovou hmotnost zdicích tvarovek pro obvodové zdivo, tak se pohybujeme v hodnotách kolem 600 – 800 kg.m⁻³, což je způsobeno děrováním tvarovky a vylehčením střepe. Hovoříme tak o tvarovkách THERM. Objemová hmotnost cihel je hmotnost jednotky vysušené cihly. Objem cihly včetně dutin je dán rozměry cihly podle ČSN EN 772 -16.

3.1.3.2 Vliv vlhkosti

Vlhkost látky má velký vliv na velikost jeho tepelně izolační vlastnosti. Zvyšováním vlhkosti materiálu dochází k růstu velikosti součinitele tepelné vodivosti, a tudíž k poklesu tepelněizolačních vlastností materiálu. Je to způsobeno jednak tím, že součinitel tepelné vodivosti vody za klidu (0,58 W.m⁻¹.K⁻¹) je cca 25 krát větší než vzduch (suchý neproudící vzduch má $\lambda \approx 0,0258$ W.m⁻¹.K⁻¹) a také tím, že v pórech dochází k přemísťování vlhkosti ve směru tepelného spádu a k šíření tepla prouděním. Závislost mezi velikostí součinitele tepelné vodivosti a velikostí vlhkosti je pro každý materiál odlišná.



Obrázek 1: Závislost součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti tří cihlářských střepe s různou objemovou hmotností (A - 1960 kg.m^{-3} , B - 1850 kg.m^{-3} , C - 1750 kg.m^{-3}) [19]

3.1.4 Tepelná jímavost

Tepelná jímavost b [$\text{W}^2 \cdot \text{s}^1 \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{K}^{-2}$] je schopnost materiálu o definované vlhkosti přijímat teplo, je definována vztahem:

$$b = \lambda \cdot c \cdot \rho$$

kde: ρ ... objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti [kg.m^{-3}];

λ ... součinitel tepelné vodivosti [$\text{W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

c ... měrná tepelná kapacita [$\text{J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] [33].

3.2 Požadavky akustické

Zvuk je mechanické vlnění, vznikající kmitáním těles, šířící se pevnými, kapalnými i plynnými látkami a vnímané sluchem člověka.

Hluk je rušivý zvuk, který vyvolává nepříjemný, rušivý vjem nebo škodlivý účinek. Například při hlukové zátěži 30 – 60 dB dochází k poruchám spánku, omezení schopnosti soustředění a snížení pracovního výkonu až o 20%, vyšší hladiny hluku způsobují psychické problémy a poruchy prokrvení mozku. Při dlouhodobém působení hluku nad 95 dB může dojít k poruchám sluchu, při 125 dB již dochází k poškození okamžitě. Hodnota 140 dB je uváděna jako práh bolesti [27].

Požadavky na stavební konstrukce z hlediska ochrany proti hluku jsou uvedeny v ČSN 73 0532 a také v příloze 2. V praxi to znamená navrhnout takové skladby a vyřešit detaily konstrukcí tak, aby se přes tyto konstrukce přenášelo co nejmenší množství hluku [20]. Pouhým vylehčováním keramického bloku dochází ke zlepšování tepelných vlastností materiálu, ale s dopadem na vlastnosti akustické [18].

3.2.1 Vzduchová neprůzvučnost

Tam, kde dochází k přenosu zvuku z místnosti do místnosti působením zdroje z vysílací místnosti do příjmové místnosti, mluvíme o vzduchové neprůzvučnosti. Zvuková energie vzniká v prostorovém zdroji hluku a přenáší se stěnou, stropem spárami, a okolními konstrukcemi. Vlastnost konstrukce zvukově izolovat dvě sousední místnosti z hlediska zvuku přenášeného vzduchem se nazývá vzduchová neprůzvučnost. Ukazatelem je vážená neprůzvučnost R_w (laboratorní) nebo R_w' (stavební) v decibelech [dB] [27].

3.2.2 Kročejová neprůzvučnost

Kročejový hluk vzniká přímým kontaktem (nárázem) na podlahu (chůze, náraz, pád předmětu na podlahu). Schopnost konstrukce tento typ hluku tlumit. Ukazatelem je vážená hladina kročejového zvuku L_{nw} [dB]. Čím je tato hodnota vyšší, tím nižší kročejovou neprůzvučnost mezi dvěma prostory můžeme očekávat. Vlastní stropní nosné konstrukce (např. železobetonový panel, trámový strop) mají nízkou kročejovou neprůzvučnost a proto se musí oddělit stropní konstrukce od roznášecí konstrukce podlahy akusticky pružnou podložkou (např. minerální vlna)[27].

3.3 Požadavky mechanické

Mechanické požadavky jsou jak u keramických výrobků, tak u výrobků izolačních velmi důležité. S mechanickými vlastnostmi materiálu souvisí celá další oblast vlastností stavební konstrukce, jako je např. únosnost, stabilita, trvanlivost, rozměrová stálost atd. Klasické cihly pálené mají obecně vysokou pevnost v tlaku (např. speciální výrobky dosahují pevnosti v tlaku 30 - 40 N.mm⁻²), dnes nejrozšířenější tvarovky THERM jsou standardně dodávány s pevnostmi 8, 10 a 15 N.mm⁻². Zde se hlavně projevuje všestrannost takových cihel, které současně splňují z fyzikálního hlediska protichůdné požadavky v oblasti mechanických a tepelně izolačních vlastností [20].

Pevnost keramického střepe je závislá na pórovitosti. Posuzuje-li se keramický střepe jako kompozit složený z matrice (tuhé keramické látky) a plniva, pak je jeho pevnost určena pevností matrice a podílu pórů v objemu látky. Závislost pevnosti keramického střepe na pórovitosti je matematicky popisována v mnoha tvarech, ale většinou s empirickými koeficienty.

Pórovitost hutných a slinutých střepeů je nízká a pevnost je více méně závislá na vzniku a rozvoji trhlinek a méně je ovlivňována pórovitostí. Pórovitost má velký význam v hrubé keramice, zejména cihelného střepe, kde u běžných zdících tvarovek je požadována minimální nasákavost 12 %.

Z technologického hlediska je pevnost keramického střepe závislá:

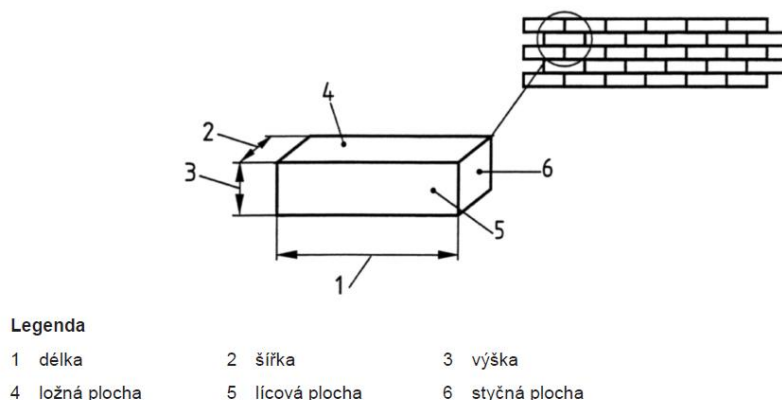
- pórovitosti střepe;
- složení střepe;
- teplotě výpalu;
- homogenitě suroviny a stejnorodosti střepe;
- stupni vylehčení otvory;
- textuře střepe [20].

Zkoušky a zařazení cihel podle pevnosti v tlaku se uskutečňují na základě evropskou normou ČSN EN 772 -1 stanoveného postupu pomocí zařízení pro tlakové zkoušky [18]. Mechanické vlastnosti cihlářských výrobků zahrnují zkoušky pevnosti v tlaku, v tahu za ohybu a únosnosti. Pevnost v tlaku se zkouší ve směru zatížení výrobku v konstrukci, tlačné plochy při jejich nerovnosti je třeba obrousit nebo zarovnat cementovou maltou. Pevnost v tahu ohybem se stanovuje zatížením jedním břemenem uprostřed podpor. Stykové plochy vzorku, podpěr a lámacího válečku musí přiléhat, proto se vkládají nad podporu a pod váleček pásy gumy profilu 5x20mm [19].

Mechanické vlastnosti u izolačních výrobků nejčastěji stanovujeme zkouškou napětí v tlaku při 10 % deformaci uvedené v normě ČSN EN 826 a pevnost v tahu kolmo k rovině desky dle ČSN EN 1607.

3.4 Vzhled a geometrické požadavky keramických výrobků

Vzhledem ke stavebnosti prvků ve stavební konstrukci jsou stanoveny tolerance rozměrů (rozdíl mezi maximálním a minimálním rozměrem) podle kategorie přesnosti výrobku a jeho typu. Zjišťuje se vizuálně vnější vzhled, tvar, začouzení, trhlínky, množství zlomků, poškození ploch, hran a rohů. Měří se jmenovité rozměry, kolmost hran, rovinnost čel, hran a ploch, nepřesnosti dosedu, prohnutí, zploštění.



Obrázek 2 : Rozměry a povrchové plochy

Vzhled a rozměry zdicích prvků jsou definovány v ČSN EN 771 -1. Pro prvky LD (zdicí prvek s nízkou objemovou hmotností určený pro použití v chráněném zdivu) musí výrobce deklarovat rozměry v pořadí: délka, šířka, výška.

Dále jsou uváděny tolerance těchto rozměrů podle kategorií T1, T1+, T2, T2+ nebo Tm (rozdíly mezi deklarovanými a průměrným rozměrem) nebo kategorií R1, R1+, R2, R2+ a Rm (rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou rozměru - příloha 3). Pokud jsou pálené zdicí prvky určeny pro zdivo s tenkými ložnými spárami, musí výrobce deklarovat největší odchylku ložných ploch prvků od rovinnosti a rovnoběžnosti těchto ploch. Rozměry se stanovují podle ČSN EN 772 -16.

Pro prvky HD (pálené prvky pro nechráněné – neomítané zdivo nebo prvek s vysokou objemovou hmotností pro chráněné zdivo) musí výrobce deklarovat rozměry prvku v pořadí: délka, šířka, výška. Dále jsou uváděny tolerance těchto rozměrů podle kategorie T1, T2, nebo Tm (rozdíly mezi deklarovaným a průměrným rozměrem) nebo kategorií R1, R2 a Rm (rozdíl mezi největším a nejmenší hodnotou rozměru [19]). Cihelné bloky jsou vyráběny v tloušťkách od 80 do 440 mm, délkách od 250 do 500 mm a výšce 238 mm (ale také 155 a

249 mm). Rozměrovou přesnost výrobků výrobci deklarují podle normy ČSN EN 771-1 [35] v třídě tolerancí T2 a R2.

Pro názornost bloky šířky 440 mm se vyrábějí s přesností ± 5 mm (výška a délka téhož bloku potom s přesností ± 4 mm). Výjimečné požadavky jsou kladeny na výrobky zděné s tenkou ložnou spárou, u kterých se po vypálení výška dále upraví broušením s deklarovanou přesností ± 1 mm [18].

4 Vývoj v oblasti zdicích materiálů pro obvodové konstrukce

V posledních letech dochází k výraznému zvýšení požadavků na vlastnosti stavebních konstrukcí v oblasti tepelné ochrany. Tyto skutečnosti se projevily také zpřísněním požadavků na materiály a prvky, které jsou určeny pro výstavbu obvodových plášťů budov [16]. Do roku 1964 platil standard tzv. cihelný ekvivalent, empiricky odvozený z tepelného odporu 450 mm silného zdiva z plných cihel pálených.

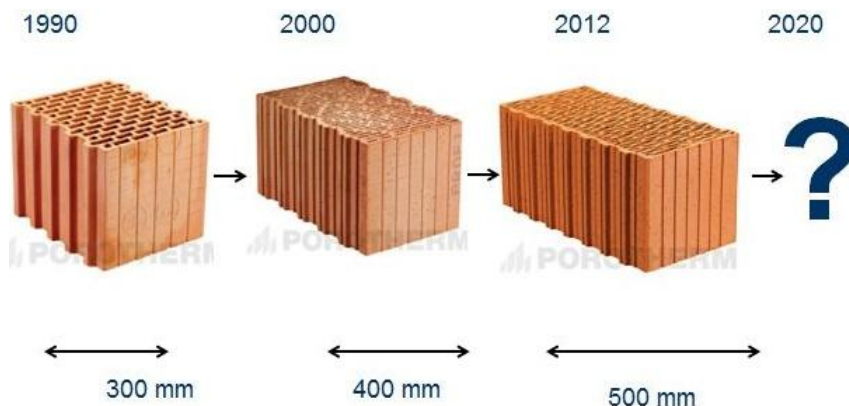
Jednalo se o tepelný odpor cca $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^1 \cdot \text{W}^{-1}$. Následně byla požadovaná hodnota tepelného odporu obvodových konstrukcí postupně navyšována, přičemž v současné době (dle ČSN 730540-2/2011) činí požadovaná hodnota tepelného odporu u jednovrstvého obvodového zdiva $R_N = 2,47 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^1 \cdot \text{W}^{-1}$ (ekvivalent požadované hodnoty součinitele prostupu tepla $U_N = 0,38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), přičemž od 1. 1. 2013 je tato hodnota dále navýšena na $R_N = 3,17 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^1 \cdot \text{W}^{-1}$ (ekvivalent požadované hodnoty součinitele prostupu tepla $U_N = 0,30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$). Toto zpříšňování tepelně technických nároků na obvodové konstrukce je jedním z hlavních podnětů k vývoji nových druhů keramických tvarovek pro obvodové konstrukce a také vývoje nových zdicích technologií a systémů výstavby [17].

V oblasti keramických tvarovek jsou obecně čtyři způsoby, jak zlepšit jejich tepelněizolační vlastnosti:

- zvýšení šířky tvarovky, tj. zvýšení tloušťky zdiva;
- snížení tepelné vodivosti keramického střepu;
- zvýšení počtu dutin a návrh optimální geometrie bloků;
- využití integrované tepelné izolace s nízkou tepelnou vodivostí [21].

4.1 Zvýšení šířky tvarovky

Zvyšování rozměrů (šířky) zdicích prvků vede ke zvýšení tloušťky obvodového zdiva a zlepšení tepelně izolačních vlastností. V současné době vyrábí většina výrobců tvarovky pro výstavbu konstrukcí s tloušťkou 500 mm. Další zvyšování tloušťky obvodového zdiva je však již prakticky nemožné a z pohledu dalšího vývoje neudržitelné [26].



Obrázek 3: Zvyšování tloušťky zdiva v čase [21]

4.2 Snížení tepelné vodivosti keramického střepu

Snížení tepelné vodivosti keramického střepu je vázáno na kvalitu vstupních surovin a na množství a druhu použitého lehčiva (případně i ostřiva). Snížení objemové hmotnosti keramického střepu vede ke snížení jeho tepelné vodivosti ale zároveň také ke snížení mechanických vlastností.

Při vylehčování keramického střepu dochází také často k problémům při sušení (zvýšením citlivosti k sušení vlivem přídavku lehčiva), a také k problémům při výpalu střepu vlivem vyhořívání lehčiva (je-li použito lehčivo, které při výpalu vyhoří), kdy při vysokém přídavku lehčiva může docházet k tvorbě redukční atmosféry v peci a problémům při výpalu.

Výrobci keramických zdicích prvků se snaží najít optimální míru vylehčení keramického střepu tak, aby bylo dosaženo požadovaného snížení součinitele tepelné vodivosti střepu bez negativního snížení mechanických vlastností a vzniku technologických problémů při výrobě [16].

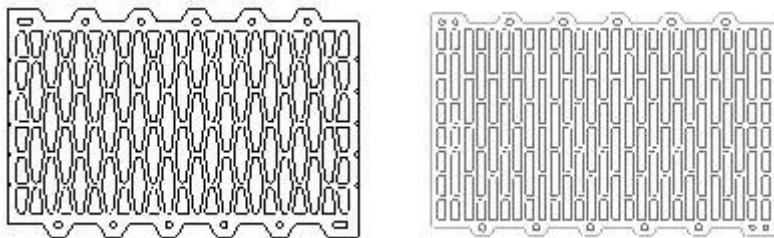
4.3 Optimální geometrie tvarovek

Většina výrobců keramiky hledá způsoby, jak redukovat tepelné vlastnosti svých produktů. Procesy vylehčování keramických tvarovek za vzniku vzduchových pórů jsou považovány za nejefektivnější způsob jak zlepšit tepelně technické parametry. Účinnost vylehčení závisí na poměru objemu vzduchu dutin a objemu keramické kostry, stejně tak na tvaru a uspořádání dutin, tloušťce vnitřních stěn mezi dutinami, a také na velikosti dutin [16].

Tvary dutin mají být úzké, dlouhé a vzájemně přesazené, orientované kolmo k tepelnému toku ve stěně. Čím větší počet řad otvorů kolmo k tepelnému toku, tím má tvarovka vyšší tepelný odpor tvarovky asi o 0,03 až 0,05 $\text{m}^2 \cdot \text{K}^1 \cdot \text{W}^{-1}$. V současné době je obvyklý podíl děrování tvarovek typu THERM v intervalu 50 až 60 % [26].

4.3.1 Snižování tloušťky stěn žeber

S geometrií a uspořádáním dutin úzce souvisí tloušťka stěn žeber. Lze říci, že většina běžných keramických tvarovek (pro obvodové zdivo) má tloušťku stěn žeber v rozmezí přibližně 4-15 mm, dle vyráběného sortimentu a požadavků na geometrické uspořádání [16].



Obrázek 4: příklady uspořádání dutin bloků[21]

4.4 Výplň dutin tvarovky pomocí tepelně izolačních materiálů

Jednou z možností pro zvýšení tepelně technických vlastností keramických bloků je použití integrované tepelné izolace do dutin bloků.

Výhody:

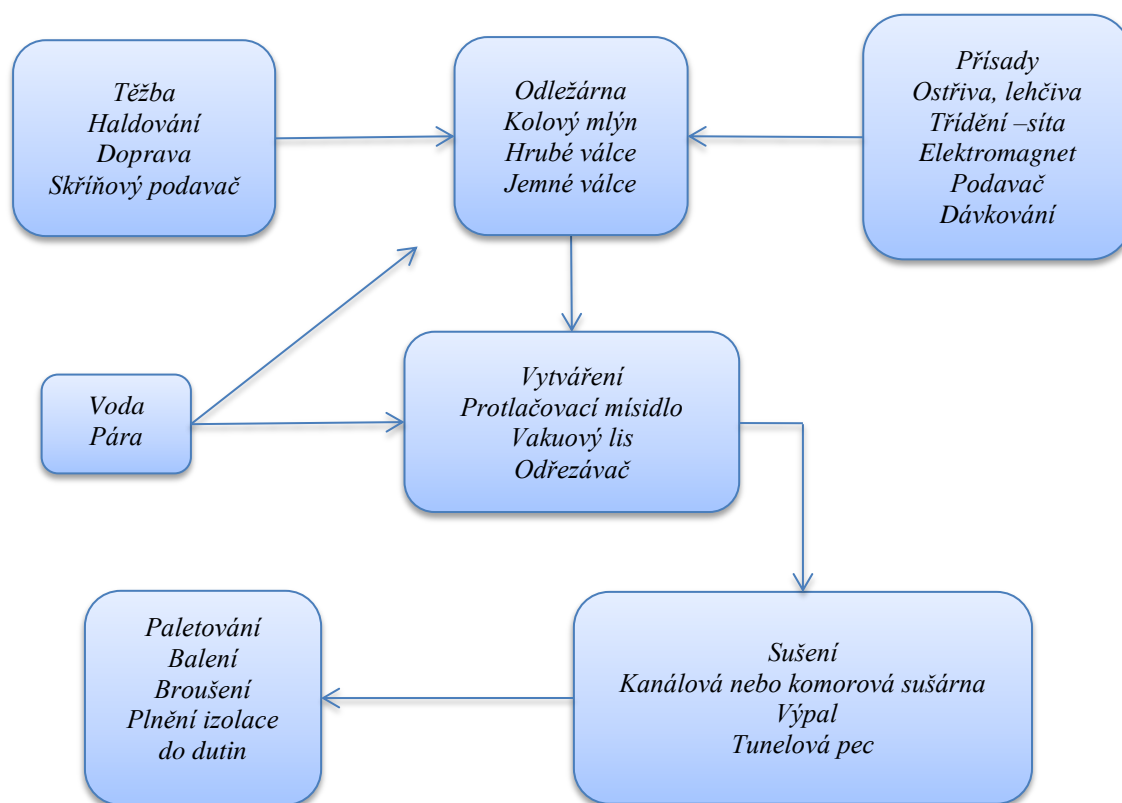
- možnost použití větší tloušťky vnitřních žeber;
- vysoké tepelněizolační vlastnosti bloků;
- tepelná vodivost izolačního materiálu je nižší než tepelná vodivost vzduchu dutin

Potřeby:

- musí být snadno použitelný pro aplikaci do dutin tvarovek;
- neměl by výrazně zvýšit konečnou cenu tvarovky [21].

Z hlediska uspořádání dutin tvarovek je nutné zvážit, jaký druh izolačního materiálu bude použit. Existují dva druhy izolačních materiálů. Prvním typem integrované izolace jsou kusové částečně stlačitelné materiály, pokud jde o druhý typ, jedná se o izolační partikulární izolanty [16]. Této problematice se podrobně věnuje kapitola 5.1.

5 Technologie výroby pálených zdicích prvků



Obrázek 5: Technologické schéma výroby cihel [20]

Cihlářská technologie zpracovává cihlářské jíly a hlíny zpravidla těžené v blízkosti cihlářských závodů [20]. Obecně lze rozdělit cihlářské suroviny na plastické (zeminy) a neplastické (přísady).

Základní surovinou pro výrobu cihlářských výrobků jsou cihlářské zeminy (jíly, hlíny). Cihlářské zeminy lze rozdělit na kvartérní (spraše a sprašové hlíny) a na terciérní nezpevněné

(jíly a slíny) nebo zpevněné (jílovce, slínovce). Z jílových minerálů je typický především illit, ale většinou jde o směs několika druhů jílových minerálů, a dále křemen, živce slídy, a velmi často i vápenec, resp. dolomit [19] .

Přísady jsou nejčastěji ostřiva (např. křemenný písek) a lehčiva (např. dřevěné piliny). Jedná se o látky, které jsou používány v určitém poměru za účelem úpravy vlastností cihlářské suroviny. Dost často se používají odpadní látky vzhledem k tomu, že cihlářská výroba je schopna ekologicky zlikvidovat velké množství odpadů s ekonomickým dopadem na výrobu. Přísady rozdělujeme podle účinku na plastické těsto nebo na konečné vlastnosti výrobků na plastifikační přísady, ostřiva, lehčiva a ve speciálních případech i taviva a barviva. Některé přísady mohou mít i více i účinků najednou.

Lehčiva jsou látky, které přispívají ke snížení objemové hmotnosti střepe. Tyto látky mohou působit **nepřímo** svou nízkou objemovou hmotností a jsou současně i ostřivy (křemelina, expandovaný perlit) nebo působí **přímo** tím, že během výpalu vyhoří a vytvoří ve střepe póry (dřevěné piliny, korková drť, uhelný prach, odpady z uhelných prádel, pěnový polystyrén, papírenské kaly aj.) Snahou je použít maximální podíl odpadních látek. Některá lehčiva obsahující organické látky uvolňují ve spalínách toxické látky, které se nedokonale spálí a musí být zajištěno jejich dodatečné spalování (např. kuličky polystyrénu) [19]. Lehčení střepe je nezbytnou součástí technologie výroby tepelně izolačních tvarovek typu THERM.

Používaná lehčiva výrazně ovlivňují vlastnosti nejen vypáleného střepe, ale i výrobní směs za syrova. Současným standardním lehčivem v cihlářství jsou dřevěné piliny v množství do 30 % objemových výrobní směsi. Pro dosažení dostatečné pevnosti cihelné tvarovky THERM v tlaku při takto nízké objemové hmotnosti tvarovky jsou téměř nezbytné papírenské kaly, které zvyšují pevnost střepe, ale na snížení objemové hmotnosti keramického střepe mají menší vliv než piliny v případě shodného objemového dávkování do surovinové směsi. Papírenské kaly obsahují 80 % nespalitelných anorganických podílů (piliny jen 1%) nejčastěji v podobě vápence a kaolinitu. Podle novějšího výzkumu jsou do cihlářského střepe vhodné měkké piliny od kotoučových pil. Z hlediska tepelně izolačních vlastností vypáleného střepe je výhodnější měkké dřevo než tvrdé, s větším štíhlostním poměrem piliny, který však snižuje pevnost střepe [29]. Účinnost lehčiva závisí na jeho sypané a objemové hmotnosti a obsahu nespalitelných zbytků.

Cihlářské zeminy musejí po úpravě a rozdělení s vodou a případně dalšími přísadami vytvořit dostatečně tvárnou výrobní směs pro příslušný technologický postup. Příprava surovinové směsice v cihlářství se děje převážně ve vlhkém stavu a představuje sled následujících operací:

- haldování, odležování (odležárny);
- úprava množství vody (voda, pára);
- drcení, mletí (kolové mlýny válce);
- homogenizace, mísení (kolové mlýny, protlačovací mísidla).

Řazení jednotlivých strojů za sebou je individuální záležitostí každé cihelny a závisí především na typu vyráběných výrobků, kvalitě suroviny a množství mísených surovin.

Další úprava surovinové směsi ve šnekovém lisu často spočívá v jejím propaření a intenzivním zhomogenizování ve šnekovém protlačovacím mísiči. Bezprostředně po této operaci se směs protlačí sítím vakuového šnekového lisu. Vlhkost výrobní směsi je cca 19 až 22 % hmotnosti a jejím zahřátí párou na teplotu 40 až 45 °C se dále zlepší její plastičnost a současně usnadní sušení vytvarovaných těles (výlisků). Při tvarování děrovaných cihel, je ústí šnekového lisu vybaveno množstvím trnů, které usměrňují tok těsta a vytvářejí požadované dutiny. Vytvarovaný pás je za lisem pomocí odřezávacího zařízení řezán na požadované velikosti cihel.

Výrobky jsou dále uskladněny v sušárnách. Tento technologický proces probíhá podle předepsaného režimu z vytvářecí vlhkosti až do vlhkosti 5 - 1% hmotnosti ve středu stěny děrované cihly. Běžně jsou používány komorové, tunelové a jednovrstvé sušárny vytápěné často odpadním teplem. Suší se při teplotě asi 80°C po dobu 30 až 35 hodin. Teplo se převážně odebírá z chladnoucího pásma pece, neboť tunelová pec a sušárna pracují jako „energetická dvojčata“ [15].

Výpal výsušku se dnes uskutečňuje zpravidla v tunelových pecích. Běžným palivem je dnes zemní plyn. Výpal se provádí při teplotě 850°C až 1050 °C, při kterém dochází ke slinování. Trvání výpalu je 30 až 35 hodin. Výrobky jsou přijatelné pro životní prostředí, jsou schopny ve výrobě nezávadně spotřebovat řadu průmyslových odpadů a po dožití jsou schopné recyklace [19].

Po výpalu je více možností, co s vypálenými výrobky dělat. Jednou z možností je přeložit cihlářský sortiment hned po výpalu z pecních vozů na palety. Dál jsou instalovány do rozebíracích linek **brousící stanice** (výrobci Wasmerr, Lingl, Keller), které dokáží přesně vybrousit ložnou plochu cihelného bloku. Princip stroje spočívá v pevném uchycení cihelného bloku dvěma přítlačnými dopravníky tak, aby jej navedl k fixnímu brousicímu zařízení. Toto sestává ze dvou dvojic rychloběžných disků osazených přímo na motoru, které mají na svém obvodu diamantové kostky. Těmito elementy při průjezdu strojem odebírá přebytečný materiál, cihelný blok se vyčistí přetlakovým a podtlakovým vzduchem.

Broušené cihly dále mohou být směřovány na plnicí linku, kde se do dutin keramických tvarovek vkládá dle dané technologie izolační materiál (kapitola 5.1).

Plně naložené palety s hotovými výrobky se v expediční lince zabalí pomocí termo-smršťovací nebo stretch (stahovací) fólie. Takto připravený sortiment na paletách se pomocí vysokozdvizného vozíku uloží do skladu hotových výrobků a odtud putuje na trh.



Obrázek 6: Brousící linka, detail fixace keramických tvarovek

5.1 Technologie vyplňování dutin keramických tvarovek

Jak už bylo okrajově zmíněno (kapitola 4.4), jednou z možností pro zvýšení tepelně technických vlastností keramických bloků je použití integrované tepelné izolace. Jedná se o poměrně novou technologii. Podle uspořádání a velikosti dutin tvarovek je nutné zvážit, jaký druh izolačního materiálu bude použit. Existují dva druhy izolačních materiálů [16].

Prvním typem jsou kusové izolanty, u kterých je nutné, aby byly částečně stlačitelné. Nejčastěji se jedná o minerální vlnu. Výhodou tohoto způsobu integrace izolační výplně do

tvarevky je relativně nízká pracnost, snadná aplikovatelnost, absence speciálních zařízení pro úpravu a vytvrzování izolantu a absence mokrých procesů.

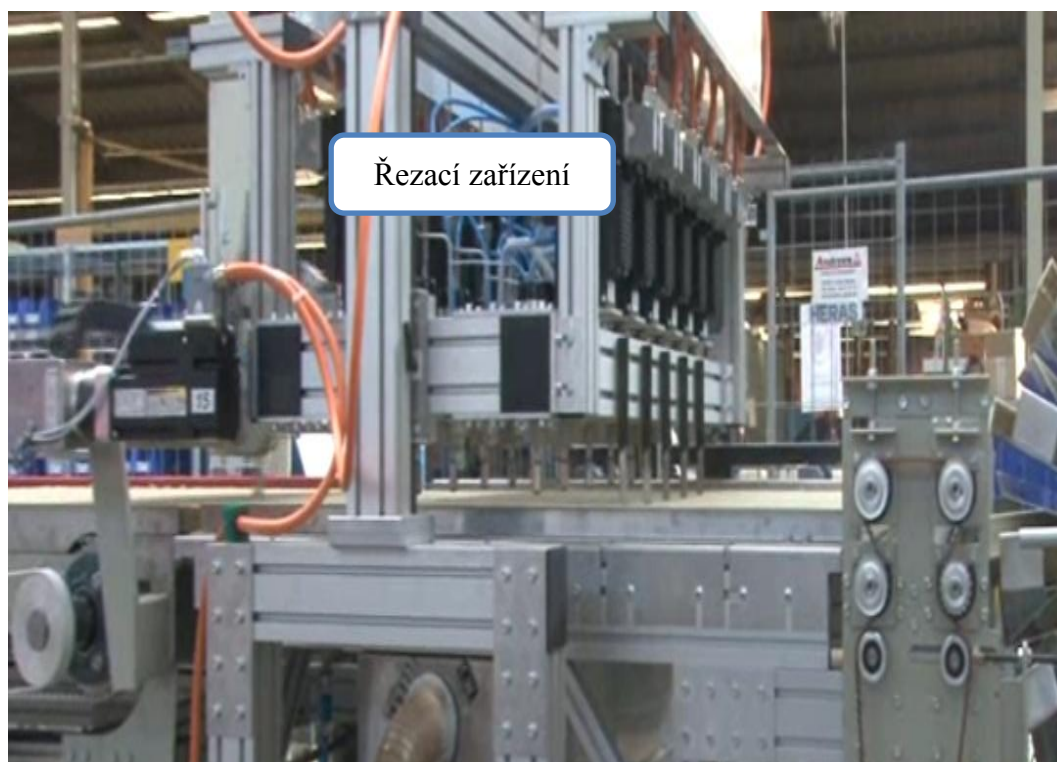
Druhým případem je použití izolačních v partikulárních a tekutých stavech, jedná se o zavhlhlé směsi plniva i pojiva, pěny nebo suspenze. Izolanty se po aplikaci nechají vyzrát a vytvrdit. V této kapitole jsou popsány technologie plnění izolace do dutin tvarovek, jde zejména o plnění kusovými izolanty, které se dále rozlišují na horizontální a vertikální vkládání. U plnění partikulárními izolanty jde o strojní propařování, vibrování a vytvrzování jak malých tak i velkých dutin a také ruční plnění přímo na stavbě.

5.2 Plnění kusovými izolanty

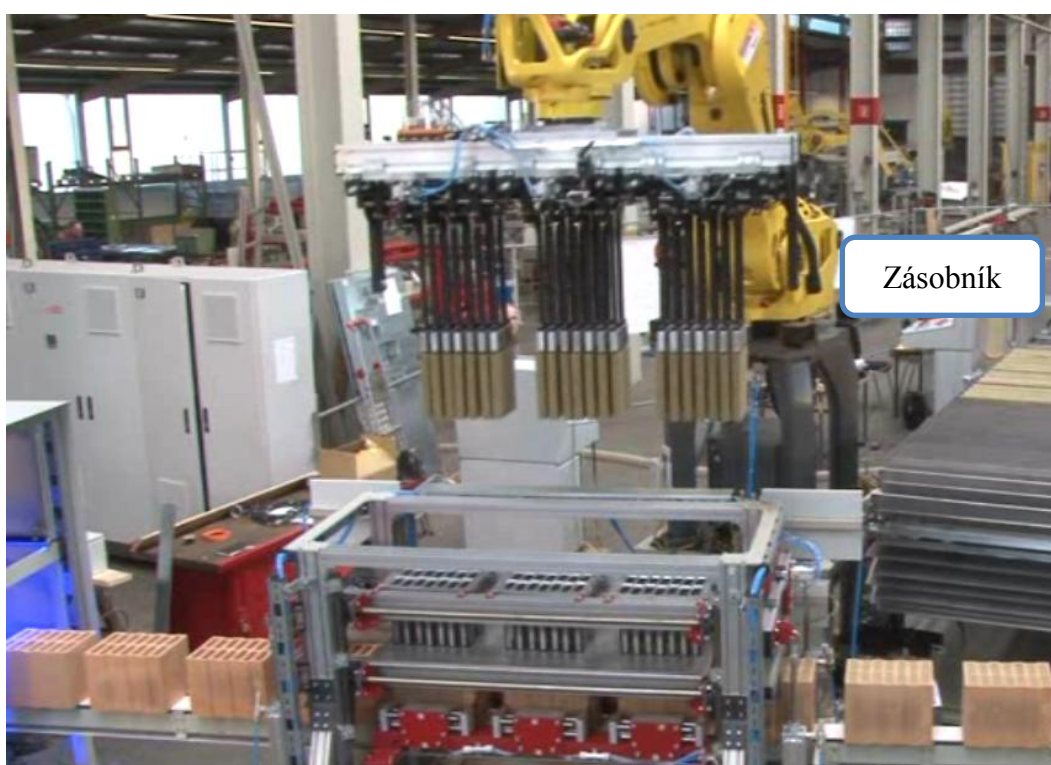
Tato technologie je poměrně jednoduchá, jedná se o samostatně stojící linku, která není závislá na ostatních technologických procesech při výrobě cihel. Principem je vkládání nařezaných pásků izolace do dutin keramických tvarovek. Technologie umožňuje vkládání integrované izolace vertikálně nebo horizontálně. Dodavatelem výrobků vyrobených touto technologií je v ČR firma Wienerberger.

5.2.1 Vertikální způsob vkládání

Nejprve se musí kusová izolace připravit. Izolační rohože jsou posunovány dopravním pásem k řezací jednotce. Na bocích dopravního pásu jsou umístěny vodící lišty, které vedou izolaci ve směru osy pásu a nedochází tak k nežádoucímu pohybu do stran a tím se zamezí nepřesnému nařezání požadovaných rozměrů. Izolační tabule jsou nejprve řezány příčně a potom podélně na požadované rozměry pomocí řezacího drátu, nebo vodního paprsku (viz obrázek 7). Materiál je po nařezání automatizovaným pohybem pásu vkládán do pohyblivého zásobníku. Zásobník je v podstatě pás s kapsami, který se po naplnění jedné kapsy nařezanými kousky izolací otáčí ve směru robotické ruky, která nařezané kusové izolace přepravuje dále pro vkládání do dutin tvarovek (obrázek 8).



Obrázek 7: Řezání a ukládání kusové izolace



Obrázek 8: Pohled na celou plnicí linku

Kusová izolace je zásobníkem přepravena k manipulačnímu prostoru robota. Převrtní hlavice robota je speciálně navrhnutá pro úchyt izolace. Sestává z plochých vidlic, které jsou rozloženy podle uspořádání dutin tvarovek. Naprogramovaný automatizovaný robot uchopí pomocí vidlic připravené nařezané kusy izolací tak, že je napíchne pomocí vidlic a přepraví je k plnicí jednotce. Robotická ruka přenese izolační materiál pro 3 tvárnice.

Dalším krokem je vložení izolace do předem připravených ocelových šablon s ocelovými packami, pod kterými se nachází broušené keramické bloky. Packy jsou hladké z ocelového plechu, usnadňují vložení izolačního materiálu do dutin (jader) cihel. Šablony kopírují tvar jader keramického bloku - šířku, délku i výšku [36].

Nyní následuje proces vložení, kdy packy šablony mírně stlačí izolaci, kterou vkládá robotická ruka do šablony, a společným pohybem umístí izolaci do tvarovek, vše je sledováno počítačem. Jakmile je izolace ve tvarovce, vysune se robotická ruka s vidlicemi. Packy přidrží izolaci, aby nedocházelo ke zpětnému vytažení jednotlivých kusů z dutin. Poté jsou packy vysunuty a následně se izolace roztáhne na stěny jader. Výkon linky této technologie je 480 až 1440 tvarovek za hodinu [30].



Obrázek 9: Detail vkládací šablony

5.2.2 Horizontální způsob ukládání

Řezání izolačních tabulí se provádí zcela obdobně jako v předcházejícím případě. Na bocích dopravního pásu jsou umístěny vodící lišty, které vedou izolaci ve směru pohybu pásu a nedochází tak k nežádoucímu pohybu do stran a tím se zamezí nepřesnému nařezání požadovaných rozměrů (šířka, délka).

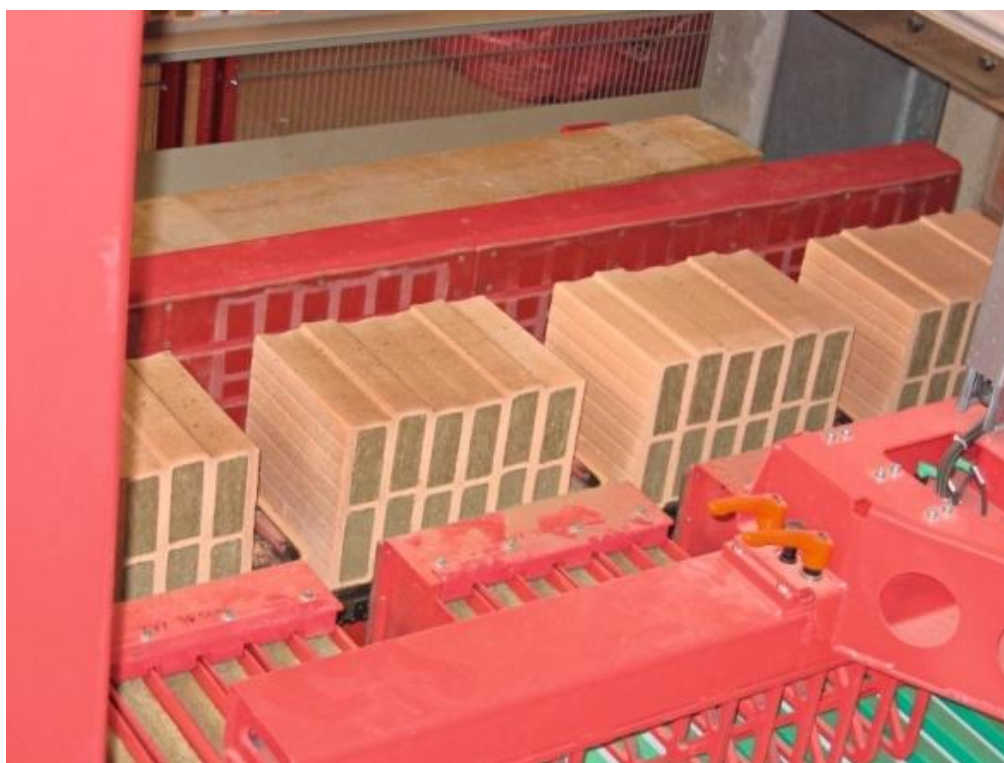
Po nařezání je materiál ukládán do pohyblivého automatizovaného pásového dopravníku. Odtud putuje do dvouúrovňového podavače, ve kterém dochází k nařezání izolantu na výšku tvarovky. Za tímto podavačem je umístěn skladovací box, do kterého je dočasně vkládán izolační materiál. Ten je dále posunut do ocelové šablony (kopíruje geometrii tvarovek), která je umístěna před pás, po kterém přijíždí broušené tvarovky určené pro plnění. Mechanizací dojde ke vtlačení izolace do dutin. Aby cihla nevybočila, je z druhé strany umístěna lišta, o kterou se tvarovky opřou.



Obrázek 10: Pohled na vkladací linku [30]



Obrázek 11: Vkládací zařízení, (šablona, strojní mechanizace) [30]



Obrázek 12: Pohled na hotové výrobky [30]

5.3 Plnění partikulárními izolanty

Další možnou technologií je plnění sypkého materiálu do velkého počtu malých dutin nebo do malého počtu velkých dutin. Jedná se zejména o vyplňování dutin:

- expandovaným polystyrénem,
- vyplňování dutin expandovaným perlitem (vyplňování malých dutin přímo na stavbě) a izolantem na bázi expandovaného perlitu (vyplňování velkých dutin),
- vyplňování dutin čedičovými vlákny (vyplňování malých dutin).

Tyto zmíněné materiály mají ale odlišné vlastnosti a je potřeba pracovat s nimi zcela odlišně a tím se i liší použitá technologie.

5.3.1 Propařování EPS v malých dutinách

Největším problémem, kterým bylo třeba vyřešit, byl vývoj technologie fixování polystyrenu do dutin v cihle. To se podařilo pracovníkům společnosti HELUZ zvládnout a na tuto technologii je nyní podána patentová přihláška [23]. Polystyrén je dodáván na plnicí linku v pytlích o objemu přibližně 200 litrů, ručně se vysypává do nádoby, která je napojená na ventilátor a polystyrén je přepravován do velkého zásobníku s názvem Big-bag.



Obrázek 13: Zásobník na polystyrén

Linka na plnění cihel polystyrénem je záležitost, která se vejde na plochu 5x5 metrů a je naprosto nezávislá na ostatní technologii. Je chráněna stěnou z polykarbonátu a sestává ze dvou dopravníků, otočného stolu (karusel) a malého vyvíječe páry. Obsluha tohoto zařízení probíhá ručně. Funguje to tak, že jsou dva pracovníci na směně. První ručně vkládá tvarovky na dopravník, který dále posunuje cihelné bloky směrem ke karuseli a druhý ručně sundává z pásu už naplněné tvarovky a ukládá na paletu. Karusel pracuje ve třech pozicích. Jedna operace trvá 15 sekund a na změnu pozice se uvažuje 5 sekund. V první poloze dojde k posunu tvarovky z pásu na karusel, kde se tvarovka osadí. V druhé poloze hubice najede na keramickou tvarovku a začne se vsypávat polystyrén, který je umístěn nad karuselem v zásobníku, současně zespodu do podložky naráží mechanickými rázy kladivo (12x), aby se polystyren dostal do všech míst dutiny tvarovky. V třetí pozici dojde současně k propaření vrchní i spodní ložné plochy tvarovky. U polystyrénu dochází k propaření směsi, kuličky polystyrenu mění své vlastnosti působením teploty a rozpínají se okolo teploty 70°C. Polystyrén ale nedrží celým svým objemem ve tvarovce, pouze na povrchu, kde došlo k propaření. Výkon linky je 3 palety za hodinu, za celou směnu pak 24 palet. Linka jede za nepřetržitého provozu tj. přibližně 4300 ks za den.



Obrázek 14: Detail karuselu pro plnění tvarovek polystyrénem

5.3.2 Ruční plnění malých dutin na stavbě

Tato technologie je relativně jednoduchá, šetří finanční prostředky pro dodání energie potřebné na provoz strojů ve výrobnách. Malé dutiny cihelných tvarovek se mohou zaplnit jemným partikulárním tepelně izolačním materiálem (polystyrén, expandovaný perlit), který je dodáván na stavbu většinou ve velkých igelitových pytlích. Pro lepší plnění je dobré využít i plnicí formy, která kopíruje obvod tvarovky a zamezí se tak nežádoucímu rozsypání partikulární směsi do okolí stavby.



Obrázek 15: Ruční plnění na stavbě[39]

5.3.3 Vibrování a vytvrzování izolačního materiálu ve velkých dutinách

Další možnou technologií je vibrování sypké směsi a následné vytvrzování. Tento typ technologie je založen na využívání přírodních materiálů zejména perlitu, ale i jiných partikulárních izolačních materiálů. Tímto způsobem plnění se zabývá např. firma Schlagmann. Perlit je ukládán do velkých zásobních sil podle frakce. Pro zajištění dobré přilnavosti ke stěnám cihly se minerální granulát vlhčí vodou a pojivem na minerální bázi před naplněním [30]. Cihly jsou dopravovány dopravníkem pod plnicí maticí. Plnicí zařízení je opatřeno šablonami, do kterých je dávkována směs perlitu. Zařízení dokáže vyplnit 3 tvarovky najednou. Keramické tvarovky jsou pomocí držáku uchyceny, aby nedošlo k posunutí. Pak nad ně najede plnicí zařízení.



Obrázek 16: Fixace cihel a plnicí zařízení



Obrázek 17: Fáze plnění



Obrázek 18: Vytvrzování v sušícím zařízení

V zařízení dojde k uvolnění směsi, za pomoci vibrace, shora se dostane hutný zrnitý materiál do tvarovky a pro lepší rovnoměrné vyplnění je ze spodu na tvarovku vyvíjen podtlak. Po vyplnění jsou cihly transportovány do sušícího zařízení, kde dojde za přibližně 2 hodiny za působení teploty 140 °C k vytvrzení izolační směsi [31].

5.3.4 Vibrování a vytvrzování malých dutin

Technologie je založena na obdobném principu technologie vkládání jako předchozí. Jen se místo expandovaného perlitu plní tvarovky čedičovými vlákny do velkého počtu malých dutin. Touto technologií jsou plněny tvarovky německé cihlářské skupiny UNIPOR s názvem výrobku CorIso. Cihly jsou dopravovány dopravníkem pod plnicí zařízení. Keramické tvarovky jsou pomocí flexibilních držáků uchyceny, aby nedošlo k posunutí tvarovky. V zařízení dojde k uvolnění směsi, za pomoci vibrace celého pásu, na kterém je tvarovka umístěna, se shora dostane vláknitý materiál rovnoměrně do tvarovky. Poté dochází k volnému vytvrzení tvarovky [38].

6 Materiály vhodné pro integrovanou izolaci

Jako izolační materiál se v současnosti nejvíce používá **minerální vlna**, a to ve formě rozřezaných desek, vkládaných do velkých dutin nebo ve formě granulátu pro vyplnění malých dutin. Další materiálovou variantou jsou partikulární směsi **perlitu**, **čedičového granulátu** nebo **expandovaného polystyrénu**. V této kapitole je uveden popis a souhrn vlastností jednotlivých materiálů vhodný pro integrovanou izolaci.

6.1 Minerální vlna

Jako minerální vlna se ve stavebnictví označují umělá anorganická vlákna vyráběná především pro tepelněizolační účely v podobě vláknité směsi, připomínající ovčí rouno, které se běžně říká minerální vlna. Minerální vlna jako materiál je vyráběna rozvlákněním roztavených přírodních hornin, silikátových průmyslových odpadů nebo jejich směsí. Nejobvyklejší používanými minerálními vlákny jsou vlákna z čedičovo-struskové směsi. Jejich výroba se uskutečňuje odstředivým rozvlákněním minerální taveniny při teplotách 1350 až 1400 °C. Jedná se o nejrozšířenější tepelně izolační materiál na trhu.

Dle použité vstupní suroviny rozeznáváme 3 základní typy minerální vlny:

- čedičová vlna;
- strusková vlna;
- skelná vlna.

Největší předností je vysoká požární odolnost, reakce na oheň dle ČSN EN 13501-1 třída A1. Součinitel tepelné vodivosti se pohybuje v rozmezí 0,032 – 0,050 W.m⁻¹.K⁻¹. Proti navlhání je tato vata chráněna hydrofobizací, takže pokud není přímo ponořena ve vodě, nenabírá vlhkost [42].

6.2 Polyuretanová izolační pěna (PUR/PIR)

Polyuretany patří k novějším typům reaktoplastů a jejich stavební použití začíná v posledních letech velký rozmach. Nespornou výhodou je skutečnost, že vytvrzování polyuretanů probíhá jako polyadice, tedy bez odštěpování vody nebo jiného nízkomolekulárního produktu. Při polyadiční reakci se pouze vytvoří vazby mezi dvojicí funkčních skupin obou reakčních partnerů. Takovýto průběh reakce lze dokumentovat na reakci diizokyanátu s dvojfunkčním alkoholem [15].

Ve stavebnictví jsou hodně používané tvrdé lehčené polyuretany. Aby u tvrdých lehčených polyuretanů mohlo proběhnout požadované větší zesíťování, vychází se ze směsí, které obsahují větší množství izokyanátů (asi 70 % celkové váhy směsi) a sloučením obsahujících větší množství hydroxylových skupin. Strukturně se to projevuje zkracováním řetězců s jejich pevnějším vzájemným spojováním. Dále se přidávají různé katalyzátory, emulgátory, stabilizátory, retardéry hoření a různé další přídavky měnící strukturu s vlastnostmi výrobku. Obecně platí, že stříkané hmoty jsou lehčí než hmoty nalévané. Důležité také je, že je lze snadno vytvářet i přímo na stavbě, což je zejména výhodné při vyplňování špatně přístupných dutin v konstrukcích, u kterých požadujeme dobrou tepelnou izolačnost [25].

Vlastnosti tvrdých lehčených polyuretanových hmot zase mohou být velmi různé. Informativně je lze uvést takto:

<i>Objemová hmotnost</i> [kg.m ⁻³]	<i>Pevnost v tlaku / napětí při 10% deformaci</i> [N.mm ⁻²]	<i>Součinitel tepelné vodivosti</i> [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
10	0,03 - 0,05	0,020
30	0,18 - 0,24	0,022
50	0,3 - 0,5	0,025
100	0,8 - 1,2	0,031
200	1,5 až 3,0	0,032

Tabulka 2: Vlastnosti polyuretanů [41]

6.3 Pěnový polystyren EPS

K výrobě pěnového polystyrénu potřebný styren (vynilbenzen) se získává z etylbenzénu. Průmyslově se dnes však styren vyrábí prakticky jen katalytickou dehydrogenací a pak následující destilací. Schematicky to lze vyjádřit takto:



Expandovaný polystyren je nejběžnější hmotou pěnového charakteru používanou v současném stavebnictví. S ohledem na hodnotu součinitele tepelné vodivosti (která u expandovaného polystyrenu činí okolo 0,04 W.m⁻¹.K⁻¹ v závislosti na objemové hmotnosti) je používán převážně pro tepelněizolační výrobky a obalovou techniku, některé aplikace však využívají i nízkou objemovou hmotnost expandovaného polystyrenu, mimořádně snadné

dělení polystyrenových desek a snadné vyřezání i složitých tvarů. U nás se lehčený expandovaný polystyrén vyrábí dvoustupňově. Jeho výhodou je snadnější možnost dopravy a skladování ještě nenaexpandovaných částic a možnost získání výrobků nejružnějších tvarů, podle okamžitých potřeb zpracovatele [25].

Výrobek má uzavřené póry poměrně velkého průměru (0,5 až 1 mm). Objemová hmotnost činí 10 až 40 kg.m⁻³. Princip tohoto postupu spočívá v tom, že se co nejdříve vyrobí polystyrénové granulky, obsahující nadouvadlo, které se pak předpěňují, po určitou dobu, skladují a teprve potom za tepla spojují. Jako nadouvadla se používají látky, které za normálních teplot svůj objem nezvětšují. Jsou to např. propan, butan, pentan, hexan, inertní plyny jako oxid uhličitý, dusík apod. Protože je polystyrén hořlavý, přidávají se často i do granule pro výrobu lehčeného polystyrénu též retardéry hoření. Mají to být látky, které jsou velmi účinné, nemění příliš ostatní vlastnosti polystyrénu, snadno netěkají, ani se nerozkládají, nejsou toxické a nepůsobí korozivně na jiné stavební materiály [25].

Maximálně přípustné teploty pro použití pěnového polystyrenu závisí stejně jako u všech termoplastů na době a na velikosti působících teplot. Bez dodatečného mechanického zatížení snese pěnový polystyren krátkodobé teploty do 100 °C. Vlivem nepatrné tepelné vodivosti polystyrenu zůstává hloubka průniku vysokých teplot relativně malá, což působí tím příznivěji, čím má EPS větší tloušťku. Pokud je mechanicky zatěžován, pak činí jeho dlouhodobá teplota pro použití v závislosti na objemové hmotnosti mezi 75 °C a 80 °C. Pěnový polystyren je hmota, u níž nedochází za teplot mezi 80 °C a –180 °C k žádným podstatným změnám struktury, proto mu nevadí ani velice nízké teploty pro trvalé využití [32]. K tomu je třeba ještě dodat, že lehčený polystyrén dobře izoluje proti kročejovému hluku [25].

<i>Pevnost v tlaku</i>	70–200 kPa při 10% deformaci
<i>Pevnost v tahu</i>	přes 100 kPa
<i>Objemová hmotnost</i>	15–35 kg.m ⁻³
<i>Maximální objemová nasákavost</i>	4–5 %
<i>Faktor difúzního odporu</i>	20–100
<i>Reakce na oheň dle ČSN EN 13501-1</i>	třída B-D

Tabulka 3: Vlastnosti EPS [41]

6.4 Expandovaný perlit

Pro expandování v žáru jsou velmi vhodné některé horniny sopečného původu, zvláště pokud utuhly jako sklo, např. perlit, obsidián, šmolek aj. Jako perlit označujeme kyselé, vodu obsahující vulkanické ryolitové (liparitové) sklo, které je složeno v podstatě z amorfního křemičitanu hlinitého.

Expandovaný perlit se vyrábí dvoustupňovým pálením. V tomto případě se surovina nejdříve pálí při teplotě 350 až 500 °C po 10 až 20 minut a potom se uskuteční vlastní expandování při teplotě 900 až 1300 °C. Podmínky výpalu jsou závislé na vlastnostech suroviny, zejména na jejím chemickém složení, obsahu vody, granulometrii, ale též na požadované objemové hmotnosti produktu.

Takto vyrobený perlit je sklovitý, bílé barvy a velmi jemně pórovitý. Proti jiným druhům pórovitého kameniva má některé příznivější vlastnosti, a to především objemovou hmotnost, která je nejdůležitějším ukazatelem jeho jakosti. Pohybuje se od 70 do 450 kg.m⁻³. Menší objemové hmotnosti přísluší jemnějším frakcím. Je jedním z nejlepších izolačních materiálů. Zásyp z něho při zrnitosti do 3 mm při objemové hmotnosti 100 kg.m⁻³ má součinitel tepelné vodivosti 0,06 W.m⁻¹.K⁻¹. Má ale nepatrnou hygroskopičnost. Avšak nasákavost zejména u nejjemnějších frakcí je velmi vysoká a může činit i přes 300 % hmotnostně. Pouze hrubší méně expandovaná zrna perlitu mají nasákavost menší než 100 % hmotnostně. Nasákavost je tedy jednou z nejméně příznivých vlastností perlit [24].

7 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem práce je vývoj tepelně izolačních tvarovek pro zděné konstrukce s integrovanou tepelnou izolací. Jedná se především o vývoj výplňového izolačního materiálu a technologie vyplňování dutin keramických tvarovek. Cílem je dosažení optimálních tepelně izolačních a mechanických vlastností tvarovek, které by bylo možné využít pro výstavbu jednovrstvého obvodového pláště stavebních konstrukcí v nízkoenergetickém a pasivním standardu.

7.1 Metodika řešení

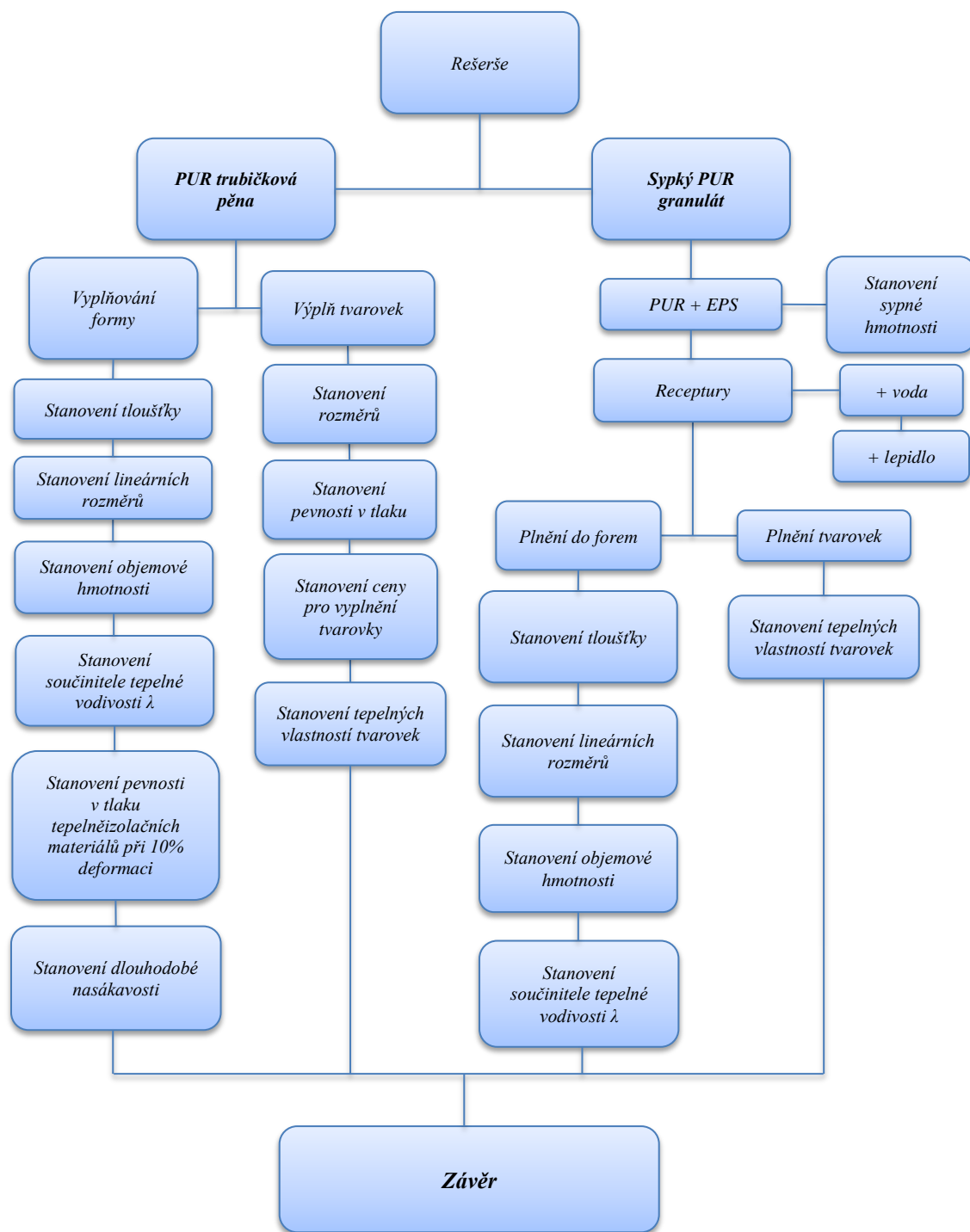
Praktická část diplomové práce se zabývá novými možnostmi vyplnění velkoobjemových dutin keramických tvarovek tepelnými izolanty s cílem zlepšení jejich tepelně izolačních vlastností a případně i mechanických vlastností.

Pro praktickou část diplomové práce byly zvoleny na základě provedené rešerše (v rámci teoretické části diplomové práce) izolanty na bázi PUR pěny, a to:

1. Běžně dostupné PUR pěny (v rámci DP byly použity různé druhy tzv. „trubičkových“ PUR pěn od několika různých výrobců),
2. Sykové směsi odpadní PUR pěny a odpadního EPS, které byly fixovány jednak termicky, a dále pomocí disperzního lepidla na bázi disperze polyvinylacetátu ve vodě.

Praktická část je tedy rozdělena na dvě hlavní etapy, první z nich je práce s polyuretanovými trubičkovými pěnama popsaných v kapitole 7.3.1, které byly plněny do speciálně upravených perforovaných forem 300x300x50mm, na kterých byly stanoveny základní fyzikální, tepelně izolační a mechanické vlastnosti. Tyto pěny se dále plnily do keramických tvarovek typu 44 - T a zkoušeny mechanické vlastnosti.

Druhá část je zaměřena na práci s odpadním polyuretanovým granulátem, který vzniká při výrobě izolačních panelů z PUR pěny a odpadním EPS, který vzniká při výrobě forem pro prefabrikované betonové výrobky. Směsi PUR a EPS byly formovány do podoby zkušebních vzorků o rozměru 40x40x160mm a pojeny byly jednak termickým způsobem (zahřátím na teplotu 90°C) a dále pomocí polymerního lepidla na bázi disperze polyvinylacetátu ve vodě.



Obrázek 19: Schéma prováděných experimentálních prací

7.1.1 Prováděné zkoušky a měření

PUR trubičkové pěny

Po vyplnění a odformování forem bylo na vzorcích provedeno následující měření a zkoušení:

- stanovení tloušťky (viz kapitoly 7.1.2, 7.3.4);
- stanovení lineárních rozměrů, (viz kapitoly 7.1.3, 7.3.4);
- stanovení objemové hmotnosti, (viz kapitoly 7.1.4, 7.3.4);
- stanovení součinitele tepelné vodivosti, (viz kapitoly 7.1.5, 7.3.5);
- stanovení pevnosti v tlaku tepelněizolačních materiálů při 10 % deformaci, (viz kapitoly 7.1.6, 7.3.6);
- stanovení dlouhodobé nasákavosti při úplném ponoření vzorků, (viz kapitoly 7.1.7, 7.3.7).

Dále byly vyplněny dutiny cihelných tvarovek, na kterých bylo provedeno:

- stanovení rozměrů, (viz kapitoly 7.1.9, 7.3.8);
- stanovení pevnosti v tlaku, (viz kapitoly 7.1.8, 7.3.8);
- stanovení tepelných vlastností (viz kapitoly 7.1.11, 7.3.9);
- stanovení ceny pro výplň jedné tvarovky, (viz kapitola 7.3.10).

Sypké směsi odpadní PUR pěny a odpadního EPS

U těchto druhů materiálů byly v laboratoři vyrobeny smluvené receptury, na kterých bylo zjišťováno:

- stanovení sypné hmotnosti, (viz kapitoly 7.1.10, 7.4.4);
- stanovení tloušťky, (viz kapitoly 7.1.2, 7.4.5)
- stanovení lineárních rozměrů, (viz kapitoly 7.1.3, 7.4.5);
- stanovení objemové hmotnosti, (viz kapitoly 7.1.4, 7.4.5);
- stanovení součinitele tepelné vodivosti, (viz kapitoly 7.1.5, 7.4.6)

Rovněž byly vyplněny dutiny cihelných tvarovek, na kterých bylo provedeno:

- stanovení tepelných vlastností (viz kapitoly 7.1.11, 7.4.7).

7.1.2 Stanovení tloušťky

Stanovení tloušťky bylo provedeno v souladu s ČSN EN 823 Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení tloušťky [43]. Podstatou zkoušky bylo změření vzdálenosti mezi tvrdým, rovinným, referenčním povrchem, na kterém spočíval zkušební vzorek, a přitlačnou deskou, volně spočívající na horním povrchu zkušební vzorku.

Zkušební vzorek se opatrně uložil na rovinnou základní desku tak, aby měřená plocha byla v dotyku se základní deskou. Přitlačná deska se umístila na zkušební vzorek při vyvinutí celkového tlaku buď $(50 \pm 1,5)$ Pa nebo (250 ± 5) Pa při označení polohy centrálně umístěného číselníkového úchylkoměru. V daném případě bylo, vzhledem k povaze zkušebních vzorků zvoleno zatížení 250 Pa. Tloušťka zkušební vzorku byla vyjádřena v milimetrech.

7.1.3 Stanovení lineárních rozměrů

Stanovení lineárních rozměrů bylo provedeno v souladu s ČSN EN 12085: Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – stanovení lineárních rozměrů zkušebních vzorků [44].

Lineární rozměry zkušební vzorku se měřily zařízením, které dosahuje požadovaného stupně přesnosti. Posuvné měřidlo se přikládalo ke zkušebnímu vzorku dotykovými plochami tak, aby nebyl deformován povrch zkušební vzorku

7.1.4 Stanovení objemové hmotnosti

Stanovení objemové hmotnosti bylo provedeno v souladu s ČSN EN 1602: Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení objemové hmotnosti [45]. Pomocí posuvného měřidla a číselníkového úchylkoměru byly naměřeny rozměry pro stanovení objemu, zvážením jsme dostali hmotnost vzorků a tyto hodnoty byly dosazeny do vzorce na výpočet objemové hmotnosti ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], která se stanovila jako podíl hmotnosti a objemu zkušební vzorku:

$$\rho_v = \frac{m}{V}$$

kde: m ... hmotnost zkušební vzorku [kg];

V ... objem zkušební vzorku [m^3].

7.1.5 Stanovení součinitele tepelné vodivosti (ČSN EN 12667)

Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno na deskových vzorcích o rozměrech 300x300 mm provedeno v souladu s ČSN EN 12667 Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku, přičemž pro stanovení hodnoty součinitele tepelné vodivosti byla zvolena metoda měřidla tepelného toku dle ČSN 72 7012-3 a ISO 8301 [46].

Principem stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu je založen na stacionární metodě desky. Měření bylo provedeno pomocí přístroje Lambda 2300 Holometrix, kde byl zkušební vzorek umístěn mezi dvě desky vytápěné na rozdílnou teplotu, přičemž je sledována hustota tepelného toku na definované ploše, teplotní spád mezi deskami a tloušťka zkušební vzorku. Měření byla provedena při střední teplotě + 10°C a teplotním spádu 10K. Níže uvedené výsledky jsou vždy aritmetickým průměrem z pěti naměřených hodnot.

U vzorků velikosti 40x40x160 mm bylo provedeno stanovení součinitele tepelné vodivosti pomocí metody horkého drátu v souladu s ČSN EN ISO 8894-1 Žárovzdorné materiály - Stanovení tepelné vodivosti - Část 1: Metoda topného drátu (křížové uspořádání a uspořádání s odporovým teploměrem) [48].

Níže uvedené výsledky jsou vždy aritmetickým průměrem z pěti naměřených hodnot.

7.1.6 Stanovení pevnosti v tlaku tepelněizolačních výrobků

Stanovení pevnosti v tlaku na vzorcích o rozměrech 200x200 mm bylo provedeno v souladu s ČSN EN 826: Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – zkouška tlakem [49]. Tlaková síla působila danou rychlostí kolmo na větší rovnoběžné povrchy pravoúhlého zkušební vzorku ve tvaru kvádru. Stanovila se maximální síla přenesená zkušebním vzorkem. Pokud hodnota maximální síly odpovídala deformaci menší než 10 %, byla označována jako pevnost v tlaku a udávala se příslušná deformace. Nebylo-li zjištěno žádné porušení před dosažením 10% deformace, vypočítalo se napětí v tlaku při 10 % deformaci a jeho hodnota se uvedla jako napětí v tlaku při 10 % deformaci.

Tlačené plochy zkušební vzorku se umístily centricky mezi rovnoběžnými deskami zatěžovacího stroje. Zkušební vzorek se zatíží počátečním tlakem (250 ± 10) Pa. Zkušební lis byl stlačován pomocí pohyblivé desky zatěžovacího stroje konstantní rychlosti 0,1 d za minutu, kde d je tloušťka vzorku v milimetrech. Ve zkoušce se pokračovalo, až k dosažení

meze tečení a tím byla stanovena pevnost v tlaku, nebo bylo docíleno poměrného stlačení 10 % a tím mohlo být určeno napětí v tlaku při 10 % deformaci.

Pevnost v tlaku σ_m [kPa] vyjádříme dle vztahu:

$$\sigma_m = \frac{10^3 \cdot F_m}{A_0}$$

kde: F_m ... největší síla [N];

A_0 ... počáteční průřez zkušební vzorku [mm²].

Poměrné stlačení ε_m v procentech, se stanovilo dle:

$$\varepsilon_m = \left(\frac{X_m}{d_0} \right) \cdot 100$$

kde: X_m ... přetvoření deformace při maximální síle [mm];

d_0 ... počáteční tloušťka zkušební vzorku [mm].

Napětí při 10 % deformaci σ_{10} [kPa] se určilo dle:

$$\sigma_{10} = \frac{10^3 \cdot F_{10}}{A_0}$$

Kde: F_{10} ... síla odpovídající 10 % poměrného stlačení [N]

A_0 ... počáteční průřez zkušební vzorku [mm²]

7.1.7 Stanovení dlouhodobé nasákavosti při úplném ponoření

Stanovení dlouhodobé nasákavosti bylo provedeno v souladu ČSN EN 12087: Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – stanovení dlouhodobé nasákavosti při ponoření [50].

Dlouhodobá nasákavost vody při úplném ponoření (metoda 2) se stanovila měřením změny hmotnosti zkušební vzorku, který byl zcela ponořen do vody po dobu 28 dní.

Počáteční hmotnost m_0 zkušební vzorku se stanovila jeho zvážením na nejbližší 0,1g. Zkušební vzorek se vložil do prázdné nádrčky a vhodně zatížil tak, aby po doplnění vodou zůstal úplně ponořen. Opatrně se přilela voda do nádrčky, až byl horní povrch zkušební vzorku ponořen (50 ± 2) mm pod hladinou vody.

Po 28 dnech se vyjmul zkušební vzorek, nechal se odkapat po dobu $(10 \pm 0,5)$ min. Poté se zkušební vzorek opět zvažil a stanovila se hmotnost m_{28} , dlouhodobá nasákavost se vypočítala ze vztahu a zaokrouhlí na 0,1 objemových procent:

$$w_{lt} = \frac{m_{28} - m_0}{V} \cdot \frac{100}{\rho_w}$$

kde: m_0 ... počáteční hmotnost zkušební vzorku [kg]

m_{28} ... hmotnost zkušební vzorku po 28 dnech úplného ponoření [kg]

V ... počáteční objem zkušební vzorku [m³]

ρ_w ... hustota vody, uvažuje se hodnotou 1000 kg.m⁻³

7.1.8 Stanovení pevnosti v tlaku u cihelných bloků

Stanovení pevnosti v tlaku u vyplněných cihelných zdicích bloků bylo provedeno v souladu s ČSN EN 772-1 Zkušební metody pro zdící prvky – část 1: Stanovení pevnosti v tlaku [51]. Zkušební vzorky připravené potřebným způsobem se uložily dostředně na tlačnou desku zkušební lisu. Rovnoměrně rozdělené zatížení působící na vzorek se zvyšovalo plynule až do porušení vzorku. Hodnota pevnosti v tlaku každého vzorku se vypočítala jako podíl největšího zatížení a tlačené plochy.

Pevnostní značka cihel	Pevnost v tlaku f_b	
	N.mm ⁻²	
	průměrná	jednotlivá
P2	2	1,6
P4	4	3,2
P6	6	4,8
P8	8	6,4
P10	10	8
P15	15	12
P20	20	16
P25	25	20
P30	30	24
P35	35	28
P40	40	32

Tabulka 4: Klasifikace pálených zdicích prvků podle pevnosti v tlaku[35]

7.1.9 Stanovení rozměrů cihelných bloků

Stanovení rozměrů bylo provedeno v souladu s ČSN EN 772 Zkušební metody pro zdící prvky – část 16: Stanovení rozměrů [52]. Rozměry (délka, šířka, výška) zkušební vzorku se měřily zařízením, které dosahuje požadovaného stupně přesnosti. Jak předepisuje norma, Každý rozměr se změřil dvakrát za pomoci posuvného měřidla přibližně ve středu tvarovky.

7.1.10 Stanovení sypné hmotnosti

Stanovení sypné hmotnosti bylo provedeno dle ČSN EN 1097 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva [53]. Sypná hmotnost sypkých směsí PUR a EPS byla stanovena na vzorcích o objemu jeden litr a toto množství bylo zváženo.

Měření bylo provedeno pro každý vzorek třikrát, výsledkem je aritmetický průměr z těchto měření. Sypná hmotnost se stanovila jako podíl hmotnosti zkušební vzorku a jeho objemu.

$$\rho_s = \frac{m'}{V_v}$$

kde: m' ... hmotnost zkušební vzorku [kg]

V_v ... objem zkušební válce [m³]

7.1.11 Stanovení tepelných vlastností

Stanovení tepelných vlastností keramických tvarovek bylo provedeno výpočtově v souladu s ČSN EN 1745. Na základě znalosti rozměrů a vnitřního uspořádání daného zdícího prvku byly sestaveny v programovém prostředí THERM modely prvku zatíženého účinkem teplotního pole $\theta_l = \theta_i = +21$ °C, $\theta_2 = \theta_e = -15$ °C. Výpočet byl proveden pomocí metody konečných prvků v souladu s ČSN EN ISO 6946. Ekvivalentní hodnota součinitele tepelné vodivosti vzduchu v dutinách prvku ve směru tepelného toku byla stanovena v souladu s ČSN EN ISO 6946.

Z pohledu tepelných vlastností cihelného střepe bylo pro výpočet zvoleno 5 různých hodnot součinitele tepelné vodivosti, které jsou typické pro cihlářské výrobky určené pro obvodové zdivo v ČR:

- tepelná vodivost 1: $0,275 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$,
- tepelná vodivost 2: $0,300 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$,
- tepelná vodivost 3: $0,325 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$,
- tepelná vodivost 4: $0,350 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$,
- tepelná vodivost 5: $0,375 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

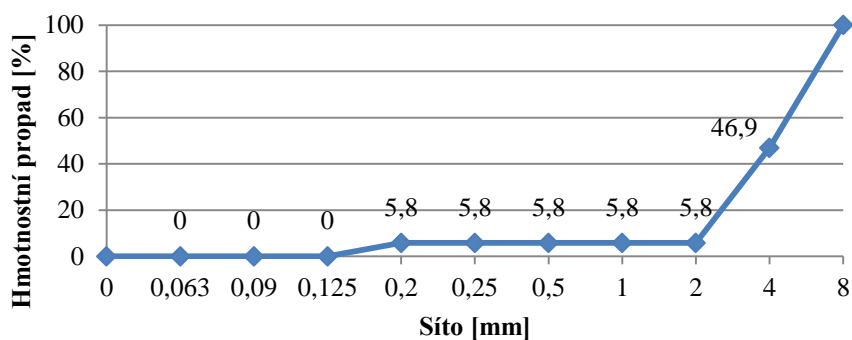
7.2 Zkušební vzorky

V rámci prováděných prací v první etapě byly vybrány trubičkové pěny od předních českých dodavatelů Den Braven a SOUDAL. Ostatní zkoušené pěny Silverline, PROBAU jsou vyráběny u těchto hlavních dodavatelů, prodávají se však pod jiným obchodním názvem a liší se množstvím a koncentrací složek. Pro lepší orientaci při měření a zkoušení vlastností byly pěny očíslovány, v závorce jsou uvedeni výrobci:

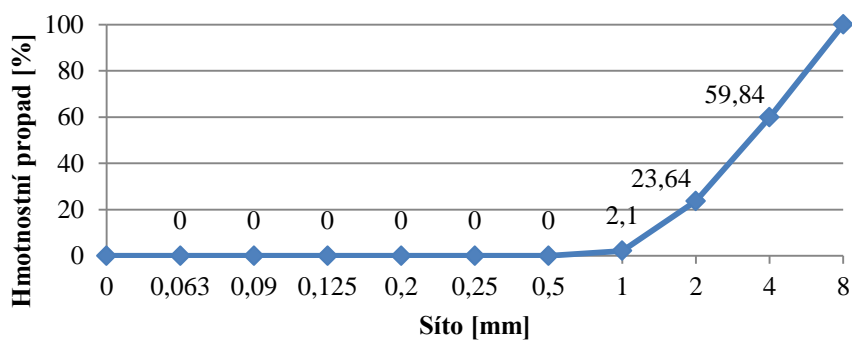
- 1 - Montážní pěna (Silverline)
- 2 – dvou komponentní pěna (Den Braven)
- 3 – víceúčelové lepidlo (Den Braven)
- 4 - nízkoexpanzní pěna (Den Braven)
- 5 - Montážní pěna (SOUDAL)
- 6 - Montážní pěna mini (SOUDAL)
- 7 - Zimní trubičková pěna - Silver line (Den Braven)
- 8 - Montážní pěna 750 (Den Braven)
- 9 - Montážní pěna zimní – (SOUDAL)
- 10 - Montážní pěna – PROBAU (SOUDAL)
- 11 – Instalační pěna (SOUDAL)

Uvedené pěny byly postupně plněny do formy, od většiny pěn se vyrobily 3-4 zkušební vzorky, na kterých se dále provádělo měření. Vybrané pěny byly plněny do velkoobjemových dutin, záměrem bylo vyplnění celé tvarovky.

V druhé části práce byla zkoušena sypká směs PUR granulátu frakce 3 – 5 mm se směsí částečně drceného expandovaného polystyrenu. Jednalo se o PUR granulát dodaný firmou Výrobní družstvo „Slezská Hořina“ Brumovice a dále o odpadní EPS dodaný firmou Prefa Brno a.s. Tyto složky byly míchány v poměru 1:1, plněny do formy 40x40x160 mm a zahřívány na 90°C , nebo míseny s lepidlem na bázi disperze polyvinylacetátu ve vodě a plněny do dutin keramických tvarovek.



Graf 1: Křivka zrnitosti PUR 3-5 mm [17]



Graf 2: Síťový rozbor EPS 3-5 mm

Receptury byly navrženy na konstantní množství 1 m^3 . Dále je zde uvedeno množství potřebné pro vyplnění jedné tvarovky.

Receptura 1:

	množství na 1 m^3 :	Množství pro vyplnění 1 tvarovky:
EPS směs	29,7 kg	474 g
PUR granulát frakce 3-5 mm	74,8 kg	1195 g

Receptura 2:

EPS směs	29,7 kg	474 g
PUR granulát frakce 3-5 mm	74,8 kg	1195 g
voda	100,2 kg	1600 g

Receptura 3:





EPS směs	29,7 kg	474 g
PUR granulát frakce 3-5 mm	74,8 kg	1195 g
Celková voda	101,4 kg	1620 g
Disperzní lepidlo	31,3 kg	500 g

Jednotlivé receptury byly plněny do dutin tvarovek. Proběhlo několik pokusů, jak připravit vzorky od každé receptury pro další měření a zkoušení (viz kapitoly 7.4.2, 7.4.3). Úspěšné byly vytvořeny vzorky o rozměrech 40x40x160mm (složení 2. receptura, postup popsán v kapitole 7.4.2, označení vzorků 2R). Bohužel se nepovedlo vždy vytvořit měřitelný vzorek, který nebyl křehký a nerozpadal se (receptury 1 a 3). Základ všech receptur vždy tvořila suchá směs, která se poté mísila s vodou nebo disperzním lepidlem. Z tohoto důvodu byla zvolena cesta, kdy se směs (receptura 1, označení vzorku 1R) nasypala a vpěchovala do formy o rozměrech 300x300x50 mm. Na takto vyrobených vzorcích byla stanovena veškerá měření.

7.3 Práce s trubičkovými PUR pěny

7.3.1 Popis použitých trubičkových polyuretanových pěn

Z chemického hlediska jsou pěna složeny z polymethylenpolyfenylisokyanátu, tris (2 - chlor - 1 - methylethyl) fosfátu, dimethyletheru, isobutanu a propanu. Liší se svou koncentrací a množstvím. Před aplikací se doporučuje u všech pěn povrch očistit, zbavit prachu, mastnoty a volných částic. Pěny spadají do třídy reakce na oheň F podle normy EN 13051-1. Jsou to tedy hořlaviny první třídy.

Označení pěny			Stručný popis/ použití
1		SILVERLINE MONTÁŽNÍ PĚNA	Jedná se o polyuretanovou pěnu s izolačními vlastnostmi. Je určena pro výplně spár, montážních a dřevěných rámců, vyplňování prostupů ve zdech, zateplování koupelnových van a střešních systémů. Povrch se nemusí před aplikací vlhčit.
2		DEN BRAVEN rychlomontážní 2K pěna	Dvousložková montážní a konstrukční pěna na bázi chemicky vytvrzujícího polyuretanu. Po smíchání obou složek je nutno pěnu do cca 8 min vypěnit. Vhodná pro vyplňování montážních prostorů mezi panely s požadavkem na vysokou pevnost.
3		DEN BRAVEN Multikleber	Jednosložkové, víceúčelové lepidlo, speciálně vyvinuto pro lepení a fixaci obkladových a konstrukčních obkladových a konstrukčních stavebních desek.
4		DEN BRAVEN Maxitrubičková nízkoexpanzní	Jednosložková polyuretanová pěna s nízkou druhotnou expanzí. Vhodná pro vyplňování spár při montáži okenních rámců a dřevěných zárubní, izolace potrubních systémů a k utěšňování průchodů ve stěnách. Pro izolaci koupelnových van, vaniček sprchových koutů, potrubních systémů a dutin.

5		Soudal - montáž & izolace	Jednosložková rozpínavá vysoce kvalitní montážní pěna. Vynikající přilnavost na většinu materiálů. Používá se pro vyplňování dutin, tmelení a vyplňování otvorů v konstrukcích střeš.
6		montážní pěna mini Soudal	Jednosložková rozpínavá vysoce kvalitní montážní pěna. Vynikající přilnavost na většinu materiálů. Používá se pro vyplňování dutin, tmelení a vyplňování otvorů v konstrukcích střeš.
7		zimní pěna Silverline	Montážní pěna s izolačními vlastnostmi. Je vhodná pro montáže okenních rámců a dveřních zárubní. Zimní pistolová pěna do -15°C Silver line - pro celoroční montáže a těsnění oken, dveřních zárubní a prahů, prostupů chráničů při teplotách pod 0°C. K vyplňování montážních prostorů mezi panely, střešním oknem a krytinou, také dutin mezi příčkami, stropem a podlahou, lepení polystyrenu.
8		DEN BRAVEN montážní pěna 750	Jednokomponentní montážní a izolační pěna vyrobená na bázi polyuretanu. Vykazuje vynikající přilnavost ke všem stavebním materiálům.
9		Soudal - montážní zimní pěna	Montážní polyuretanová pna jednosložková, rozpínavá. Dá se použít na všechny druhy ploch kromě teflonu, PE, PP. Před aplikací pěny se povrch doporučuje navlhčit, navlhčení zlepšuje přilnavost, průběh vytvrzování a výslednou strukturu pěny.
10		PROBAU montážní pěna	Jednosložková rozpínavá polyuretanová pěna určena k montáži a utěsňování rámců oken a dveří, vyplňování stavebních spár a dutin, upevňování střešních prvků, nanášení tepelně izolačních vrstev apod.
11		Soudal instalační pěna	Instalační pěna je jednosložková rozpínavá polyuretanová pěna s hnacím plynem bez CFC nepoškozujícím ozónovou vrstvu země. Díky speciální receptuře zajišťuje vyšší výsledný objem pěny až o 75%. Minimální rozpínání pěny při vytvrzování zaručuje že „to co vidíme, je to, co získáme“. Podklad je dobré navlhčit před aplikací

Tabulka 5: Přehled použitých pěn [54][55]

7.3.2 Vyplňování forem PUR pěny

Po první zkušenosti, kdy se pěny vyplňovaly do ocelových forem vymazaných odbedňovacím přípravkem s vodou, došlo po odformování k nevytvrzení pěny. Vzorek pěny se buď smrštil, nebo vůbec ve formě nezreagoval. Proto bylo zapotřebí vyrobit novou formu z voděodolné překližky. Pěna měla tendenci se ve formě rozpínat. Stěny forem byly proto zajištěny větším počtem šroubů. Do stěn forem byla pomocí vrtačky vyvrtána síť malých otvorů o průměru 1,5 mm, aby se k aplikované polyuretanové pění dostalo co nejvíce vzduchu potřebného k vytvrzení. Na vnitřní povrch stěn formy se umístil navlhčený filtrační

papír pro bezproblémového odformování a pro zajištění lepšího nárůstu struktury pěny. Takto připravované vzorky měly simulovat chování pěn v dutinách tvarovky.



Obrázek 20: Nepovedený vzorek, nová forma, vyplnění nové formy pěnou (zleva)

Pěna byla ve formě ponechána 24 hodin, poté byla přebytečná pěna seříznuta a vzorek byl připraven pro další měření a zkoušení.

7.3.3 Vyplňování dutin tvarovek

Pěny se dále plnily do keramických tvarovek typu 44 - T o rozměrech 248x425x249 mm. Keramická tvarovka byla položena na ochrannou fólii, aby se pěna nepřichytila k podlaze. Při prvním vyplňování dutin byla pěna aplikována zhruba do poloviny výšky tvarovky. Jak je vidět na obrázku 21, pěna nevyplnila celý objem dutiny (vzorek pěny č. 9 viz tabulka 5). U dalšího typu pěny proběhlo navlhčení stěn tvarovky, pěna byla opět vyplněna do poloviny výšky. Zreagovala úplně jiným způsobem, došlo k výraznému zvětšení objemu pěny (vzorek č. 8). Zde narážíme na problém, že každá pěna má jiné vlastnosti. Musí se vzít do úvahy jaké množství pěny aplikovat do dutin, aby nedocházelo při velkém množství k nežádoucímu nadzvedávání ložných ploch tvarovek při výstavbě jednovrstvého obvodového pláště způsobenou rozpínáním pěny.



Obrázek 21: Vyplňování tvarovek PUR pěnou nenavlhčené tvarovky, navlhčené tvarovky, seřezání tvarovky (zleva)

Po vyplňování a následném vytvrzení byla vždy potřeba přebytečnou pěnu seříznout. Při této technologii plnění také došlo k problémům, kdy se pěna v dutině smršťovala, nebo dokonce vůbec nezreagovala. Závada je zapříčiněna výskytem prachu v dutině tvarovky, který se zachytí na povrchu dutin při broušení ložných ploch. Jak je zmíněno v odstavci 7.3.1 výrobci doporučují, aby se povrch před vypěňováním očistil a zbavil prachu, tím se zlepší přídržnost pěny k povrchu (obrázek 22). Vyplněné tvarovky byly dále označovány písmenem T a číslem použité pěny (např. T. 1).



Obrázek 22: Možné vady při vyplňování - smrštění PUR pěny, nepravidelná struktura pěny v dutině, špatně zreagovaná pěna (zleva)

7.3.4 Stanovení tloušťky, lineárních rozměrů a objemové hmotnosti

Měření tloušťky, lineárních rozměrů a stanovení objemové hmotnosti bylo stanoveno dle výše uvedených norem ČSN EN 823, ČSN EN 12085, ČSN EN 1602. Byly měřeny vzorky o rozměrech 300x300x50 mm připravených způsobem popsáném v odstavci 7.3.2. Měření bylo prováděno v různých časových intervalech, kdy se sledovalo objemové chování vzorků (změna hmotnosti a rozměrů). Jelikož se jedná o velmi rozsáhlé měření, byly zde uvedeny hodnoty po odformování a po posledním měření, tedy po 12 dnech.

(Všechna podrobná měření jsou uvedena v příloze 4)

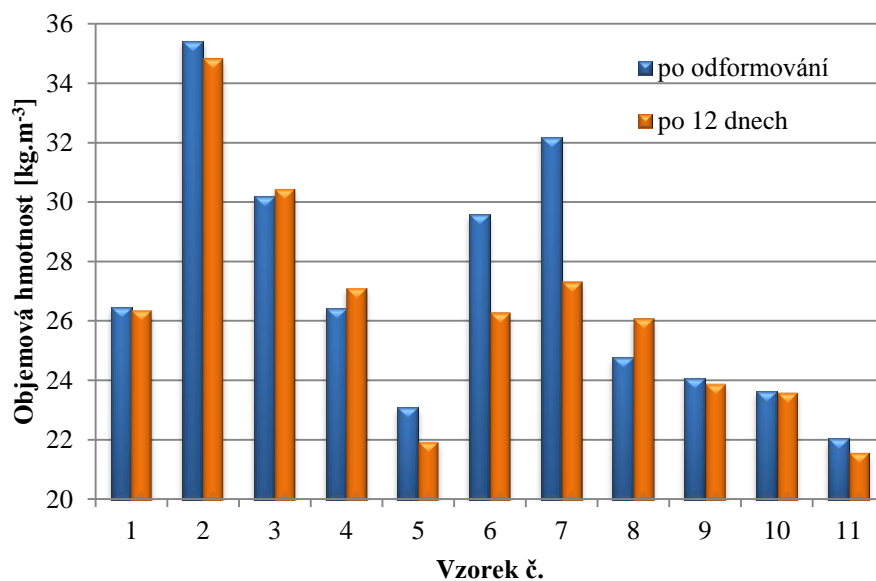
po odformování (1 den)						po posledním 4. měření (12 dní)				
Vzorek č.	l	b	h	m	ρ_v	l	b	h	m	ρ_v
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg.m ⁻³]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg.m ⁻³]
1.1	300,38	300,68	64,47	130,01	22,3	290,40	289,83	68,19	95,85	16,7
1.2	254,62	294,74	62,39	120,23	25,7	253,54	295,74	62,27	117,85	25,2
1.3	301,05	297,44	51,20	128,13	27,9	297,40	291,09	48,62	123,52	29,3
1.4	300,55	301,11	52,07	132,96	28,2	295,97	300,27	47,72	129,74	30,6
1.5	299,91	297,21	53,43	134,16	28,2	297,29	295,98	48,63	128,64	30,1
2.1	174,86	303,02	43,96	101,37	43,5	174,30	302,57	44,50	100,22	42,7
2.2	296,25	298,38	46,98	125,64	30,3	295,60	298,16	46,80	122,50	29,7
2.3	298,72	297,74	47,55	137,57	32,5	298,55	297,63	47,37	135,05	32,1
3.1	297,92	296,52	61,07	121,01	22,4	291,98	290,03	56,33	113,40	23,8
3.2	293,58	294,35	45,04	126,13	32,4	294,39	295,24	45,43	124,43	31,5
3.3	298,62	297,26	49,47	131,44	29,9	299,40	297,96	46,52	128,56	31,0

3.4	295,53	297,26	44,96	142,26	36,0	295,61	297,29	44,97	140,60	35,6
4.1	295,84	294,94	68,92	127,16	21,1	276,42	286,56	65,81	106,60	20,4
4.2	285,64	290,63	38,85	91,67	28,4	287,53	291,64	40,39	89,94	26,6
4.3	288,80	294,08	42,52	122,48	33,9	286,87	291,74	38,58	117,19	36,3
4.4	298,37	295,72	48,70	95,55	22,2	296,17	293,88	42,02	92,26	25,2
5.1	304,68	297,05	44,55	85,34	21,2	302,30	297,21	44,31	82,66	20,8
5.2	297,84	298,81	48,62	96,50	22,3	297,98	298,45	48,29	96,52	22,5
5.3	288,80	294,08	42,52	95,86	26,5	298,40	299,48	48,18	95,83	22,3
5.4	297,29	299,35	48,52	96,60	22,4	297,91	298,68	48,48	96,55	22,4
6.1	268,71	289,39	40,81	85,56	27,0	268,71	289,39	40,81	83,48	26,3
7.1	268,71	289,39	40,81	102,15	32,2	288,59	281,45	43,71	97,06	27,3
8.1	298,20	297,96	49,31	105,10	24,0	295,72	297,93	45,73	103,24	25,6
8.2	299,93	298,00	50,02	113,54	25,4	293,65	299,72	46,01	110,22	27,2
8.4	296,77	297,98	48,10	103,78	24,4	296,02	294,86	46,30	101,64	25,2
9.1	301,51	300,93	51,83	104,31	22,2	296,10	298,61	49,79	100,81	22,9
9.2	295,67	292,11	47,00	106,58	26,3	294,98	296,78	48,89	105,16	24,6
9.3	293,07	296,21	47,78	100,31	24,2	291,86	293,29	47,13	98,41	24,4
9.4	299,45	296,30	50,50	106,21	23,7	295,14	297,92	49,23	103,05	23,8
10.1	298,15	299,07	48,71	95,62	22,0	297,44	299,06	48,22	94,55	22,0
10.2	297,42	298,63	48,88	100,66	23,2	297,40	298,54	48,56	100,42	23,3
10.3	297,45	277,55	48,40	99,22	24,8	297,15	277,62	48,27	98,54	24,7
10.4	298,29	296,28	48,76	105,42	24,5	297,99	296,90	48,59	104,95	24,4
11.1	297,81	296,92	48,37	95,11	22,2	297,50	297,90	48,33	89,64	20,9
11.2	298,64	299,83	49,11	104,16	23,7	298,69	298,44	48,73	102,31	23,6
11.3	299,12	299,99	48,94	87,72	20,0	298,55	299,12	48,65	85,72	19,7
11.4	298,64	299,03	48,98	97,59	22,3	297,98	298,63	48,00	95,01	22,2

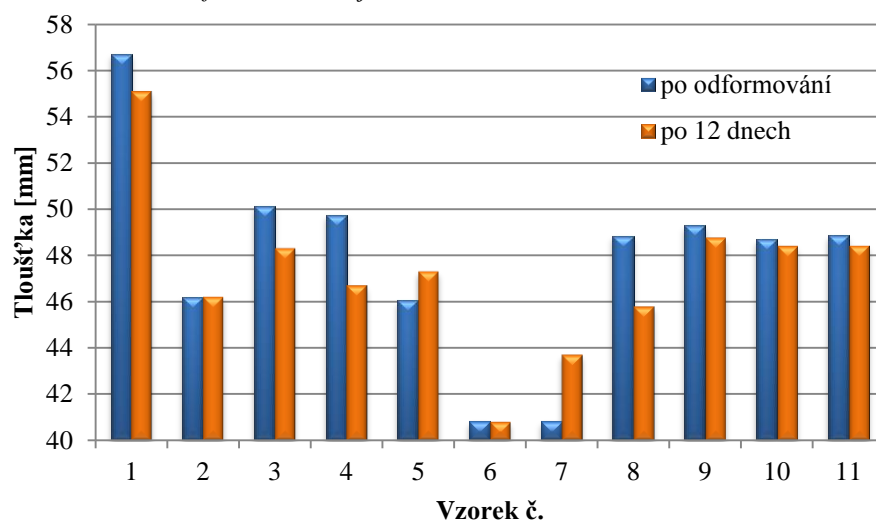
Tabulka 6: Průměrné hodnoty pro stanovení tloušťky, lineárních rozměrů, objemové hmotnosti

Vzorek č.	po odformování			po 12 dnech			Změny pozorované na vzorcích		
	ρ_v	h	m	ρ_v	h	m	ρ_v	h	m
[-]	[kg.m ⁻³]	[mm]	[g]	[kg.m ⁻³]	[mm]	[g]			
1	26,5	56,71	129,10	26,4	55,08	119,12	-0,3%	-2,9%	-7,7%
2	35,4	46,17	121,53	34,8	46,22	119,26	-1,7%	0,1%	-1,9%
3	30,2	50,13	130,21	30,5	48,31	126,75	0,9%	-3,6%	-2,7%
4	26,4	49,75	109,22	27,1	46,70	101,50	2,6%	-6,1%	-7,1%
5	23,1	46,05	93,58	22,0	47,31	92,89	-4,9%	2,7%	-0,7%
7	32,2	40,81	102,15	27,3	43,71	97,06	-15,1%	7,1%	-5,0%
8	24,8	48,83	107,36	26,1	45,79	104,98	5,4%	-6,2%	-2,2%
9	24,1	49,28	104,35	23,9	48,76	101,86	-0,7%	-1,1%	-2,4%
10	23,6	48,69	100,23	23,6	48,41	99,62	0,0%	-0,6%	-0,6%
11	22,1	48,85	96,15	21,6	48,43	93,17	-2,0%	-0,9%	-3,1%

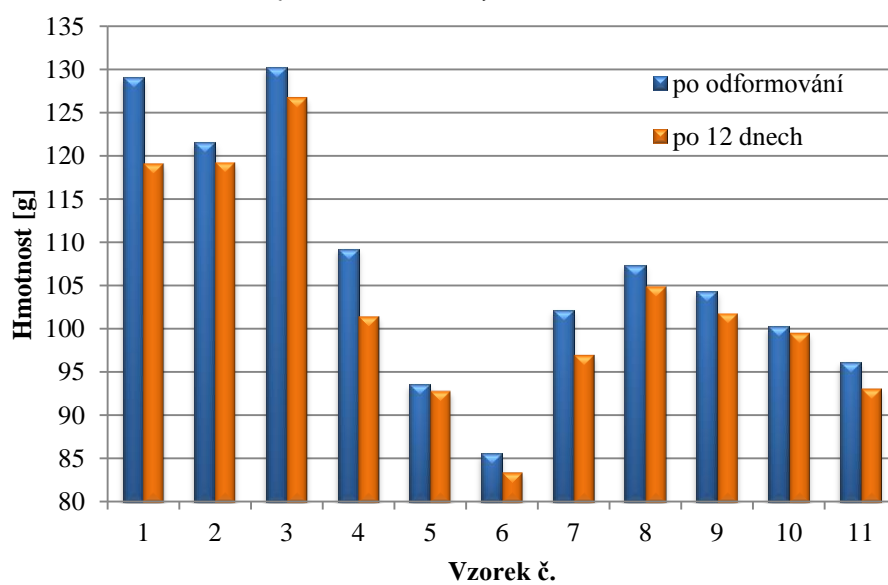
Tabulka 7: Shrnutí změn pozorovaných na zkoušených vzorcích



Graf 3: Změna objemové hmotnosti vzorků v čase



Graf 4: Změna tloušťky vzorků v čase



Graf 5: Změna hmotnosti v čase

Z grafů lze vyčíst, že u většiny vzorků došlo ke změnám. Pěna tedy po odformování a měření po určité době mění své vlastnosti. Pokud se nyní podíváme na jednotlivé pěny, nejmenší výkyvy objemové hmotnosti vykazovaly vzorky pěn s označením 9, 10 kde nedošlo k žádnému výraznému poklesu objemové hmotnosti, naopak vzorky označené čísly 6, 7 zaznamenaly nejvyšší změnu objemové hmotnosti. V případě tloušťky došlo k nejvyššímu smrštění s hodnotou - 6,2% u pěny č. 8, naopak k vypouknutí a zvětšení tloušťky došlo u vzorku č. 7. Po 12 dnech došlo ke snížení hmotnosti všech vzorků, u pěny č. 1 o 7,7%. Po zhodnocení všech měřených hodnot vzorky číslo 2 – dvoukomponentní Den Braven a také pěna č. 10 – monážní pěna PROBAU a také pěna č. 9 - montážní zimní pěna SOUDAL, zaznamenaly nejmenší změny.

Po tomto měření byly vyřazeny dva druhy a to montážní pěna mini SOUDAL a zimní pěna Silverline. První zmiňovaná pěna je dodávána v malém balení s malým množstvím pěny, ale složení má stejné jako montážní pěna SOUDAL č. 5. Druhý typ pěny se hned po odformování výrazně smrští a při plnění dutin a následném rozřezání tvarovky není struktura pravidelná, obsahuje velké vzduchové kapsy.

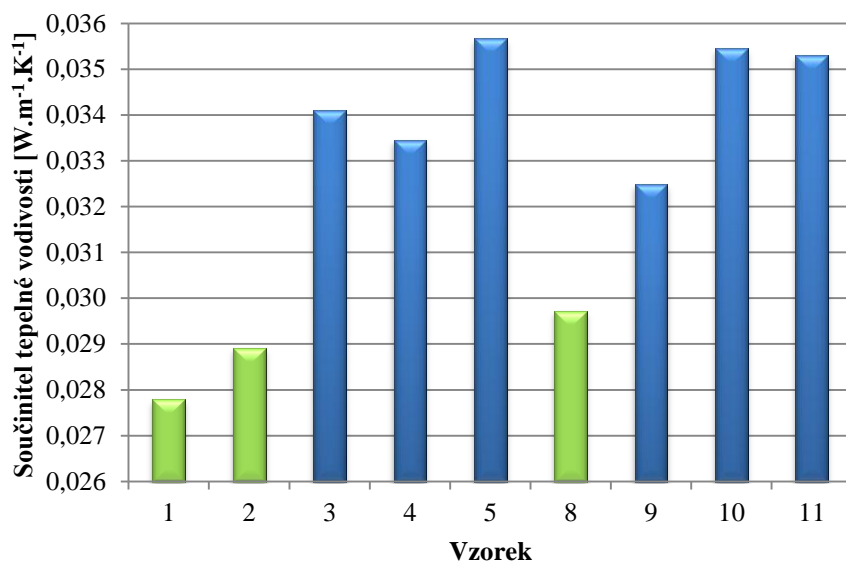
7.3.5 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti byl stanoven v souladu s ČSN EN 12667, přičemž pro stanovení hodnoty součinitele tepelné vodivosti byla zvolena metoda měřidla tepelného toku dle ČSN 72 7012 - 3 a ISO 8301. Jak je uvedeno v předchozí kapitole, pro měření se dále neuvažovalo s pěny č. 6 a 7.

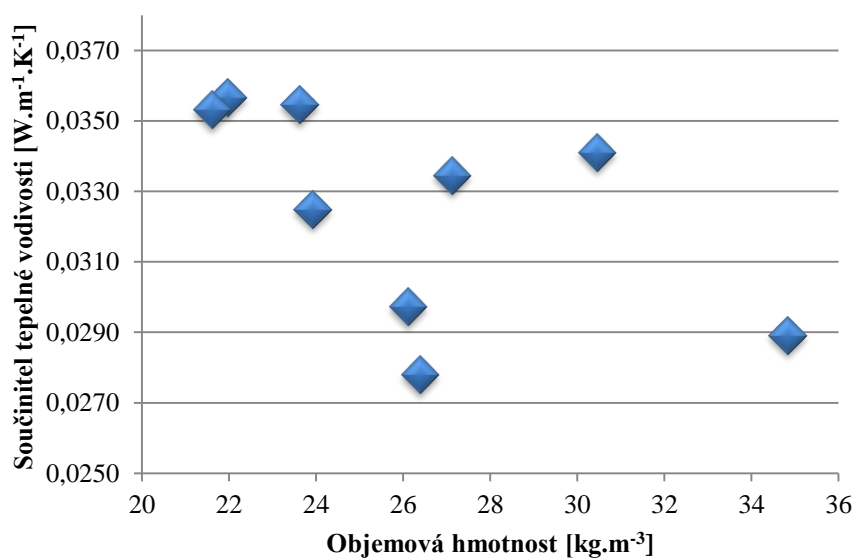
Vzorek č.	m	l	b	h	ρ	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	$\lambda_{\text{průměr}}$
[-]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg.m ⁻³]	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]					
1.1.	95,85	292,71	298,78	63,12	17,4	0,0280	0,0280	0,0280	0,0280	0,0280	0,0278
1.3.	128,03	301,05	297,44	51,20	27,9	0,0283	0,0282	0,0283	0,0284	0,0283	
1.4.	131,66	298,26	300,16	48,34	30,4	0,0275	0,0271	0,0270	0,0273	0,0272	
1.5.	131,08	297,35	295,04	48,71	30,7	0,0277	0,0278	0,0275	0,0275	0,0276	
2.1.	100,22	174,31	302,57	44,49	42,7	0,0238	0,0237	0,0241	0,0239	0,0239	0,0289
2.2.	122,58	295,61	298,17	46,80	29,7	0,0301	0,0298	0,0297	0,0298	0,0298	
2.3.	135,61	298,72	297,74	47,55	32,1	0,0279	0,0278	0,0282	0,0281	0,0279	
3.1.	113,40	291,98	290,05	56,31	23,8	0,0335	0,0337	0,0339	0,0341	0,0340	0,0341
3.2.	124,45	294,40	295,20	45,40	31,5	0,0344	0,0343	0,0344	0,0343	0,0344	
3.3.	128,37	299,41	297,98	46,52	30,9	0,0344	0,0335	0,0342	0,0341	0,0342	
4.2.	89,83	287,50	291,60	40,40	26,5	0,0329	0,0341	0,0331	0,0335	0,0336	0,0335
4.4.	92,29	296,17	293,88	42,02	25,2	0,0335	0,0336	0,0333	0,0334	0,0335	
5.1.	82,66	302,30	297,21	44,31	20,8	0,0368	0,0371	0,0371	0,0371	0,0370	0,0357
5.2.	96,44	297,98	298,45	48,29	22,5	0,0353	0,0353	0,0352	0,0352	0,0353	
5.3.	95,67	298,40	299,54	48,14	22,2	0,0353	0,0353	0,0353	0,0352	0,0353	
5.4.	96,41	297,25	299,42	48,62	22,3	0,0351	0,0352	0,0350	0,0351	0,0351	

8.1.	93,31	295,72	297,93	45,73	23,2	0,0314	0,0313	0,0315	0,0314	0,0313	0,0297
8.3.	105,95	293,65	299,72	45,11	26,7	0,0284	0,0284	0,0281	0,0281	0,0282	
8.4.	101,64	296,02	294,86	46,30	25,2	0,0294	0,0295	0,0296	0,0296	0,0296	
9.2.	105,16	294,98	296,78	49,79	24,1	0,0329	0,0329	0,0326	0,0327	0,0328	0,0325
9.4.	102,61	295,14	297,92	48,89	23,9	0,0323	0,0322	0,0322	0,0321	0,0322	
10.1.	94,44	297,68	298,63	48,38	22,0	0,0363	0,0363	0,0362	0,0362	0,0363	0,0355
10.2.	100,41	297,40	298,54	48,56	23,3	0,0358	0,0359	0,0356	0,0356	0,0356	
10.3.	98,57	297,15	277,62	48,27	24,8	0,0358	0,0349	0,0351	0,0352	0,0351	
10.4.	104,94	297,99	296,90	48,59	24,4	0,0345	0,0347	0,0346	0,0347	0,0346	
11.1.	89,64	297,50	297,90	48,33	20,9	0,0353	0,0354	0,0348	0,0349	0,0351	0,0353
11.2.	102,57	298,69	298,44	48,73	23,6	0,0351	0,0362	0,0361	0,0358	0,0355	
11.3.	85,64	298,55	299,12	48,65	19,7	0,0351	0,0352	0,0352	0,0352	0,0351	
11.4.	95,05	297,98	298,63	48,00	22,3	0,0353	0,0352	0,0351	0,0352	0,0352	

Tabulka 8: Stanovení součinitele tepelné vodivosti



Graf 6: Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Graf 7: Vliv objemové hmotnosti na součinitel tepelné vodivosti λ

Po naměření součinitele tepelné vodivosti se nejlépe jeví vzorek č. 1, jedná se o Silverline montážní pěnu, která má průměrnou hodnotu $0,0278 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Další Pěny, které mají hodnotu součinitele tepelné vodivosti těsně pod $0,03 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ jsou pěny č. 2 Den Braven dvoukomponentní pěna a č. 8 montážní pěna 750 od Den Braven.

Z naměřených hodnot byla sestavena závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti, přičemž mezi oběma veličinami byla zjištěna pouze slabá korelace (korelační koeficient 0,56).

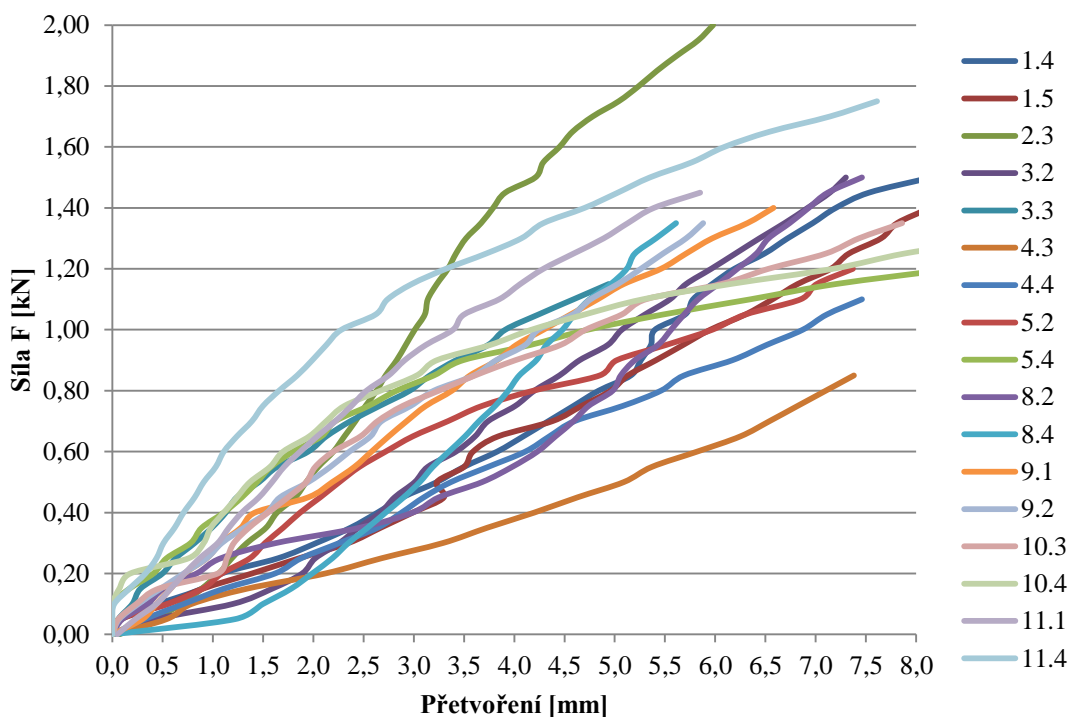
7.3.6 Stanovení pevnosti v tlaku tepelněizolačních materiálů při 10 % deformaci

Bylo provedeno stanovení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 826, přičemž vzhledem k charakteru deformační křivky u zkušebních vzorků (měřena 10% deformace vzorku od počátečního zatížení) byla stanovena hodnota napětí při 10% deformaci σ_{10} [kPa]. Měření bylo provedeno na vzorcích o rozměrech 200x200 mm. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

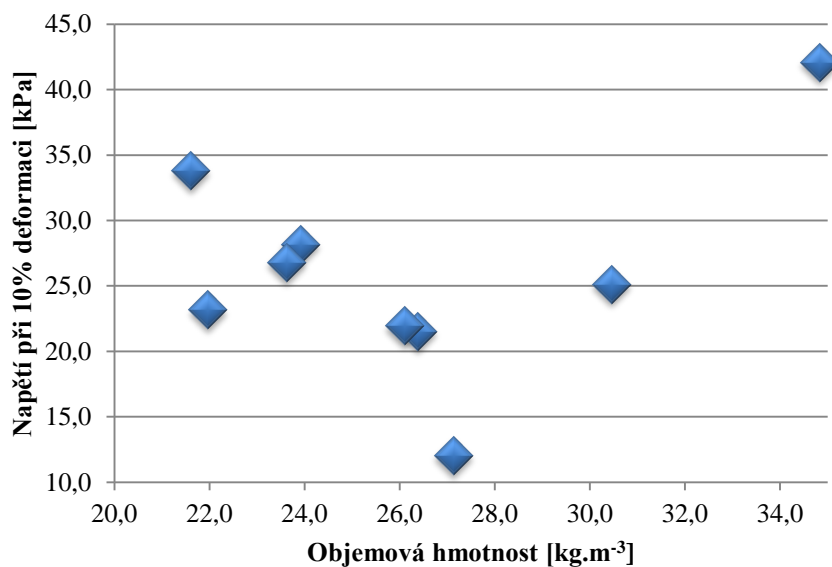
(Veškerá naměřená data jsou umístěna v příloze 5)

Vzorek č.	Plocha vzorku	ρ	F10	σ_{10}
[-]	[m ²]	[kg.m ⁻³]	[kN]	[kPa]
1	0,03954	26,4	0,85	21,5
2	0,04040	34,8	1,70	42,1
3	0,03979	30,5	1,00	25,1
4	0,03958	27,1	0,47	12,0
5	0,04002	22,0	0,93	23,1
8	0,03989	26,1	0,87	21,9
9	0,03993	23,9	1,12	28,2
10	0,03926	23,6	1,05	26,8
11	0,03996	21,6	1,35	33,8

Tabulka 9: Výsledné hodnoty při stanovení 10 % deformace



Graf 8: Pracovní diagramy zkoušených vzorků



Graf 9: Závislost objemové hmotnosti na napětí při 10 % deformaci

Nejvyšší hodnotu 42,1 kPa při 10 % deformaci měla pěna č. 2, druhá nejvyšší hodnota 33,8 kPa pěna č. 11, naopak nejnižší hodnotu zaznamenal vzorek č. 4.

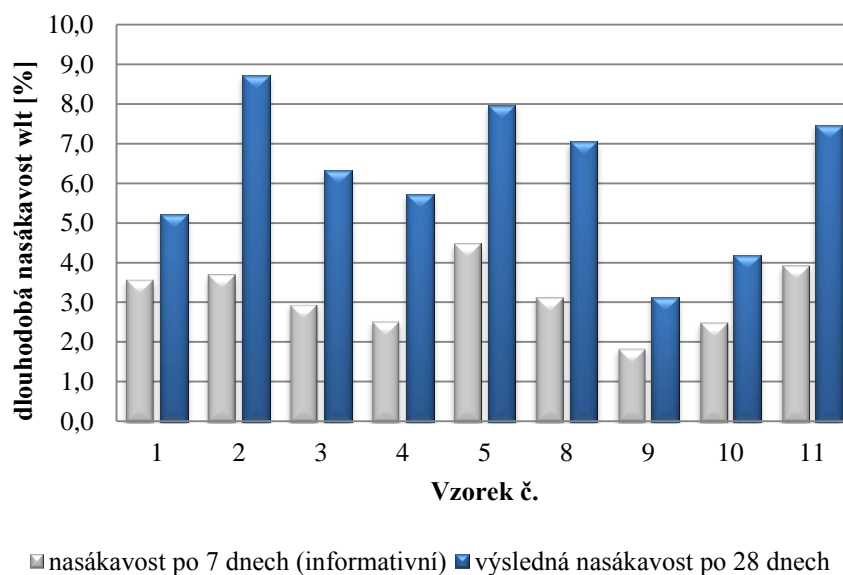
Z naměřených hodnot byla sestavena závislost objemové hmotnosti na pevnosti v tlaku při 10 % deformaci vzorků, přičemž mezi oběma veličinami byla zjištěna pouze slabá korelace (korelační koeficient 0,32).

7.3.7 Stanovení dlouhodobé nasákavosti

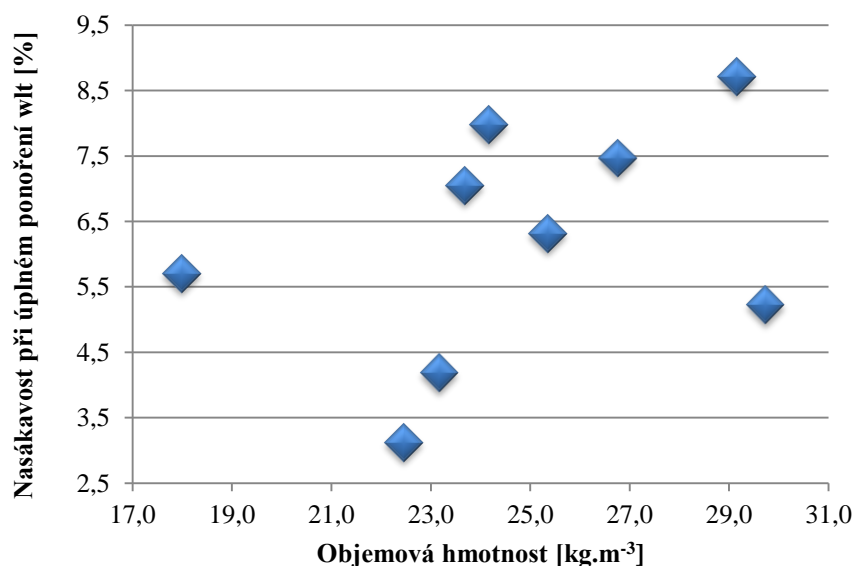
Dlouhodobá nasákavost při ponoření w_{lt} [%] byla stanovena dle výše uvedené ČSN EN 12087. Pro stanovení byla použita metoda č. 2, kde se nasákavost stanoví měřením změny hmotnosti zkušebního vzorku, který je zcela ponořen do vody po dobu 28 dní. Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce:

vzorek č.	m_0	m_7	m_{28}	l	b	h	V	ρ_v	w_{lt}
[-]	[g]	[g]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[m ³]	[kg.m ⁻³]	[%]
1.5	20,97	46,16	57,83	157,07	97,25	46,18	0,0007054	29,7	5,2
2.3	19,77	44,89	78,87	149,21	98,66	46,07	0,0006782	29,2	8,7
3.2	14,53	31,44	50,73	159,61	78,88	45,52	0,0005731	25,4	6,3
4.4	13,29	31,96	55,45	148,97	100,03	49,58	0,00073881	18,0	5,7
5.2	17,38	49,58	74,75	154,85	97,51	47,63	0,00071919	24,2	8,0
8.4	14,13	32,8	56,2	156,18	82,56	46,28	0,00059674	23,7	7,0
9.2	16,06	29,21	38,4	146,76	99,59	48,93	0,00071515	22,5	3,1
10.3	14,05	29,2	39,45	149,91	85,18	47,5	0,00060654	23,2	4,2
11.3	18,24	44,99	69,13	142,27	98,29	48,75	0,00068171	26,8	7,5

Tabulka 10: Naměřené hodnoty pro stanovení dlouhodobé nasákavosti při úplném ponoření



Graf 10: Dlouhodobá nasákavost vzorků při úplném ponoření



Graf 11: Závislost nasákavosti na objemové hmotnosti

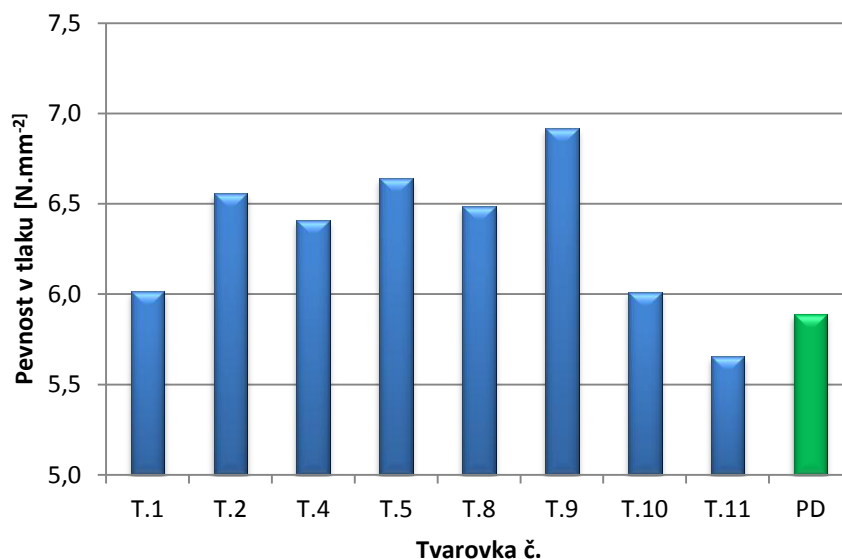
V tabulce byly uvedeny hmotnosti jednotlivých vzorků měřených po 7 dnech, bylo zajímavé sledovat, jak se nasákavost u jednotlivých vzorků zvyšuje v intervalu měření. Nejnižší nasákavost 3,1 % při úplném ponoření po 28 dnech vykazuje vzorek číslo 9 – montážní zimní pěna Soudal, naopak nejvyšší nasákavost vykazuje vzorek č. 2 - dvousložková montážní pěna Den Braven. Z naměřených hodnot byla sestavena závislost dlouhodobé nasákavosti při úplném ponoření na objemové hmotnosti, přičemž mezi oběma veličinami byla zjištěna pouze slabá korelace (korelační koeficient 0,39).

7.3.8 Stanovení mechanických vlastností tvarovek

Broušené tvarovky typu T - 44 byly vyplněny trubičkovou PUR pěnou a na těchto tvarovkách bylo provedeno stanovení rozměrů a pevnost v tlaku (ČSN EN 772 – 16, ČSN EN 772-1). Před provedením zkoušky byla použita sololitová deska, která se umístila na ložnou plochu mezi zkoušenou tvarovku a tlačnou plochu lisu. Deska vyrovnávala nerovnosti tvarovek. Nebylo uvažováno se zkoušenou pěnou č. 3 multikleber – Den Braven, jelikož docházelo k velkému vnitřnímu pnutí na vnitřní žebra tvarovky, po rozřezání toto univerzální lepidlo zkroutilo řez tvarovkou. Pro porovnání vlastností byly odzkoušeny dvě tvarovky bez integrované izolace.

Tvarovky s výplní							
Označení	m	l	b	h	F	A	f _b
[-]	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[mm ²]	[N.mm ⁻²]
T.1	15,59	450,11	251,07	249,12	674	112065	6,0
		443,73	250,43	249,21			
		446,92	250,75	249,17			
T.2	15,73	445,73	250,65	249,06	733	111789	6,6
		446,17	250,7	249,12			
		445,95	250,68	249,09			
T.4	15,54	446,18	250,13	249,08	715	111569	6,4
		445,98	250,09	249,08			
		446,08	250,11	249,08			
T.5	15,44	450,09	249,87	249,21	743	111904	6,6
		445,48	249,94	249,09			
		447,79	249,91	249,15			
T.8	15,53	450,05	249,88	249,16	726	111957	6,5
		445,59	250,13	249,1			
		447,82	250,01	249,13			
T.9	15,38	445,63	250,61	249,07	770	111363	6,9
		443,85	250,19	249,27			
		444,74	250,40	249,17			
T.10	15,47	454,12	249,97	249,14	683	113623	6,0
		454,43	250,27	249,1			
		454,28	250,12	249,12			
T.11	15456	446,285	251,13	249,145	633	111964	5,7
		445,77	250,92	249,22			
		446,03	251,03	249,18			
Tvarovky bez výplně							
1.PD	15489	444,91	251,25	249,19	678	111784	6,1
2.PD	15566	444,92	250,69	249,16	637	111536	5,7
Průměrná pevnost v tlaku tvarovek bez výplně							5,9

Tabulka 11: Naměřené rozměry tvarovek a stanovení pevnosti v tlaku



Graf 12: Porovnání hodnot pevnosti v tlaku keramických tvarovek s integrovanou izolací (modře) a bez izolace (zeleně)

Označení tvarovky	f_b	Změna pevnosti tvarovky po vypěnění
[-]	[N.mm ⁻²]	[%]
T.1	6	2,1%
T.2	6,6	11,4%
T.4	6,4	8,8%
T.5	6,6	12,8%
T.8	6,5	10,1%
T.9	6,9	17,4%
T.10	6	2,1%
T.11	5,7	-4,0%

Tabulka 12: Přehled pevnostních charakteristik keramických tvarovek vyplněných různými vzorky PUR pěn a srovnání jejich mechanických vlastností oproti tvarovkám nevyplněným



Obrázek 23: Tvarovka před zkouškou, tvarovka bez výplně po provedení zkoušky, tvarovka s výplní po provedení zkoušky (zleva)

Všechny tvarovky byly po vyhodnocení zatříděny do pevnostní třídy P6, tudíž nedochází k navýšení pevnostní třídy u tvarovek s integrovanou izolací oproti prázdným. Jedná se o nižší pevnostní třídu, běžně se výrobky dodávají v pevnostní třídě P8 a výše. Ovšem ke změnám zde došlo, tvarovky s výplní se chovaly zcela odlišně při zkoušení pevnosti v tlaku, kdy držely tvar i při porušení vzorku, naopak tvarovky nevyplněné měly tendenci roztržít se (explodovat). Tvarovky bez výplně byly za pomoci aritmetického průměru zprůměrovány a porovnány s tvarovkami vyplněnými PUR. Většina tvarovek vykazovala vyšší pevnosti, u pěny č. 9 je to 17,4 %, u pěny č. 5 byl nárůst pevnosti o 12,8 % a u pěny č. 2 11,4 %. Naopak u pěny č. 11 se neprojevovalo žádné zvýšení.

7.3.9 Stanovení tepelných vlastností tvarovek

Dále byl proveden výpočet tepelných vlastností tvarovek vyplněných vzorky PUR pěn dle ČSN EN 1745. Přehled vypočítaných tepelných hodnot u tvarovek vyplněných PUR pěnou je uvedený v následujících tabulkách:

		Součinitel tepelné vodivosti izolační výplně [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]								
		PUR 1	PUR 2	PUR 3	PUR 4	PUR 5	PUR 8	PUR 9	PUR 10	PUR 11
		0,0278	0,0289	0,0341	0,0335	0,0357	0,0297	0,0325	0,0355	0,0353
Součinitel tepelné vodivosti střepu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,275	0,1419	0,1449	0,1588	0,1572	0,163	0,1471	0,1546	0,1624	0,1619
	0,3	0,1481	0,1511	0,1652	0,1636	0,1694	0,1533	0,1609	0,1689	0,1683
	0,325	0,1541	0,1572	0,1714	0,1698	0,1757	0,1594	0,1671	0,1752	0,1746
	0,35	0,16	0,1631	0,1775	0,1759	0,1819	0,1654	0,1731	0,1813	0,1808
	0,375	0,1659	0,169	0,1835	0,1819	0,1879	0,1713	0,1791	0,1874	0,1868

Tabulka 13: Přehled vypočítaných hodnot součinitele prostupu tepla U [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] u pálených zdicích prvků vyplněných PUR pěnou

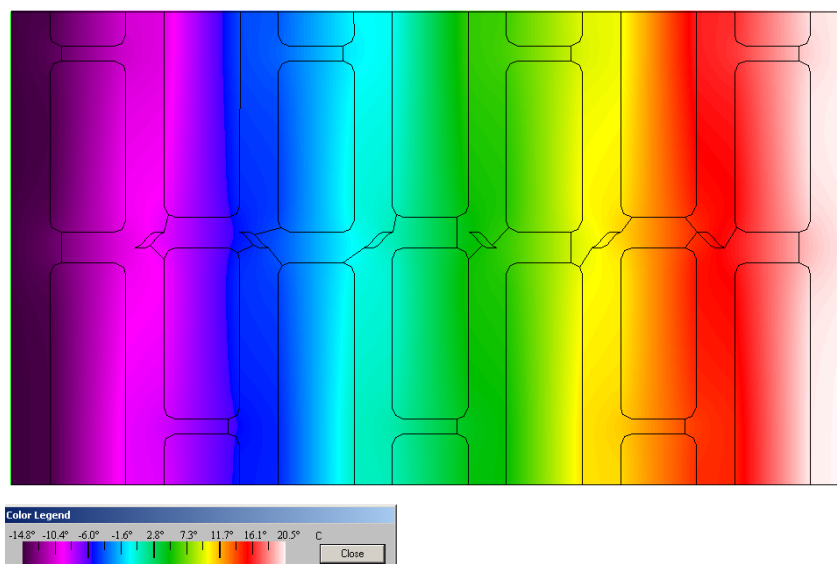
		Součinitel tepelné vodivosti izolační výplně [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]								
		PUR 1	PUR 2	PUR 3	PUR 4	PUR 5	PUR 8	PUR 9	PUR 10	PUR 11
		0,0278	0,0289	0,0341	0,0335	0,0357	0,0297	0,0325	0,0355	0,0353
Součinitel tepelné vodivosti střepu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,275	6,8822	6,7363	6,1322	6,1963	5,97	6,6331	6,3033	5,9926	6,0117
	0,3	6,5872	6,4531	5,8883	5,9475	5,7382	6,3582	6,05	5,7557	5,7768
	0,325	6,3243	6,1963	5,6693	5,7243	5,5265	6,1085	5,8194	5,5428	5,5624
	0,35	6,085	5,9662	5,4688	5,52	5,3325	5,8809	5,612	5,3507	5,366
	0,375	5,8627	5,7522	5,2846	5,3325	5,157	5,6727	5,4185	5,1712	5,1883

Tabulka 14: Přehled vypočítaných hodnot tepelných odporů R [$\text{m}^2\cdot\text{K}^1\cdot\text{W}^{-1}$] u pálených zdicích prvků vyplněných PUR pěnou

		Součinitel tepelné vodivosti izolační výplně [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]								
		PUR 1	PUR 2	PUR 3	PUR 4	PUR 5	PUR 8	PUR 9	PUR 10	PUR 11
		0,0278	0,0289	0,0341	0,0335	0,0357	0,0297	0,0325	0,0355	0,0353
Součinitel tepelné vodivosti střepu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,275	0,0639	0,0653	0,0718	0,071	0,0737	0,0663	0,0698	0,0734	0,0732
	0,3	0,0668	0,0682	0,0747	0,074	0,0767	0,0692	0,0727	0,0764	0,0762
	0,325	0,0696	0,071	0,0776	0,0769	0,0796	0,072	0,0756	0,0794	0,0791
	0,35	0,0723	0,0737	0,0805	0,0797	0,0825	0,0748	0,0784	0,0822	0,082
	0,375	0,0751	0,0765	0,0833	0,0825	0,0853	0,0776	0,0812	0,0851	0,0848

Tabulka 15: Přehled vypočítaných hodnot ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti λ_{eq} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] u pálených zdicích prvků vyplněných PUR pěnou

Jak je z výše uvedených výsledků patrné keramické tvarovky vyplněné PUR pěnou vykazují velmi dobré tepelně izolační vlastnosti, hodnota tepelného odporu se pohybuje v rozmezí 5,16 až 6,88 $\text{m}^2 \cdot \text{K}^1 \cdot \text{W}^{-1}$ v závislosti na druhu PUR pěny a součiniteli tepelné vodivosti keramického střepu. Z pohledu tepelně izolačních vlastností se jako nejlepší jeví pěna č. 1, 2 a 8.



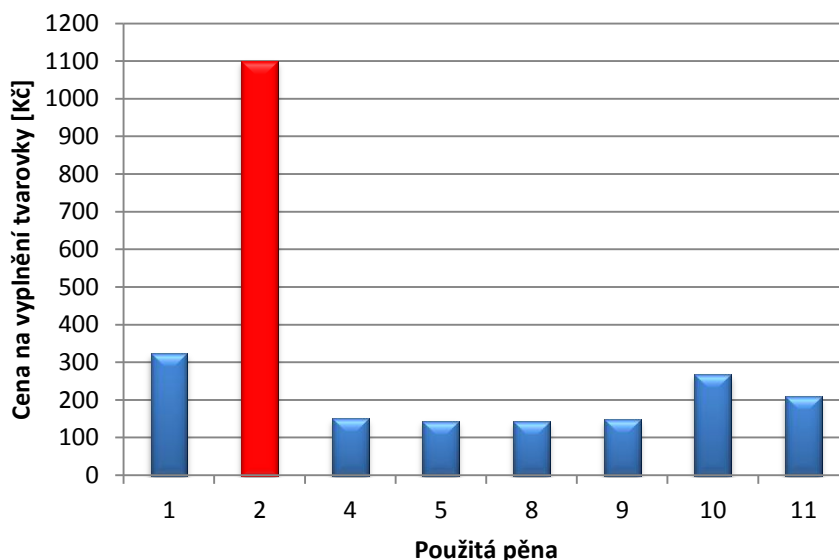
Obrázek 24: Výpočtové rozložení teplotního pole (IR zobrazení) v páleném zdicím prvku Model 42,5 T – 7 při okrajových podmínkách: $\theta_1 = \theta_i = +21^\circ\text{C}$, $\theta_2 = \theta_e = -15^\circ\text{C}$ ($\lambda_{\text{střep}} = 0,250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $\lambda_{\text{izolant, PUR1}} = 0,0278 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

7.3.10 Stanovení ceny potřebné k vyplnění tvarovky

Bylo provedeno cenové srovnání zkoušených pěn, potřebných pro výplň dutin jedné tvarovky typu 44 - T. Tvarovky obsahují dva typy dutin o průměrných rozměrech 43,6x67x249 mm a 43,1x144,85x249 mm po sedmi řadách. V tabulce byly uvedeny pěny, s kterými se vyplňovaly dutiny. Každá pěna měla jiný objem nádoby a byla potřeba vyplňovat rozdílným množstvím. Uvedené ceny byly čerpány ze stránek výrobců, jedná se o maloobchodní ceny.

Ozn.	Název	Cena balení pěny	Množství PUR v 1 balení	Předpokládané množství PUR na vyplnění dutin tvarovky	Celkové náklady na vyplnění dutin 1 tvarovky
[-]	[-]	[Kč]	[g]	[g]	[Kč]
1	SILVERLINE MONTÁŽNÍ PĚNA	81	288,09	1152,36	324
2	DEN BRAVEN rychlomontážní 2K pěna	275	394,66	1578,64	1100
3	DEN BRAVEN Multikleber	174,5	666,15	666,15	174,5
4	DEN BRAVEN Maxitrubičková nízkoexpanzní	151,2	662,96	662,96	151,2
5	SOUDAL - montáž & izolace	143,3	671,29	671,29	143,3
8	DEN BRAVEN montážní pěna 750	142	643,18	643,18	142
9	SOUDAL -montážní zimní pěna	148,3	671,44	671,44	148,3
10	PROBAU montážní pěna	89	274,75	824,25	267
11	SOUDAL instalační pěna	208,3	695,85	695,85	208,3

Tabulka 16: Cenové porovnání pro výplň jedné tvarovky



Graf 13: Cenové porovnání pro výplň jedné tvarovky

Samotné vyplňování dutin keramických tvarovek PUR pěnou je poměrně nákladná záležitost, stanovení ceny bylo provedeno z maloobchodních cen dostupných pěn. Nejlevnější varianta ze všech zkoušených pěn s částkou 142 Kč byla stanovena u pěny č. 8 – montážní pěna 750 od výrobce Den Braven. Naopak z ekonomického hlediska nepřichází v úvahu aplikace dvousložkové pěny DEN Braven, kdy vypěnění stojí 1100 Kč.


Vyplňování by probíhalo přímo na stavbě, pěna by byla dodávána v objemnějších lahvích pro výplň více tvarovek najednou, cena izolantu by se tak na jednu tvarovku mohla snížit až o 30 %. Pro srovnání se stávající tvarovka s integrovanou minerální vlnou Porotherm 42,5 T

Profi cenově pohybuje kolem částky 104,90 Kč, prázdná tvarovka 44 Profi kolem 62,10 Kč (42,8 Kč na izolaci). Při snížení ceny (o 30%) a použití nejlevnější varianty PUR pěny je tvarovka cenově srovnatelná se stávajícím sortimentem.

7.4 Práce se sypkou směsí PUR granulátu a polystyrenu EPS

7.4.1 Popis disperzního lepidla

Popis použitého lepidla, které se použilo jako pojivo do třetí receptury.

Lepidlo	Stručný popis/použití
 <p>Disperzní lepidlo DUVILAX LS-50</p>	<p>Lepidlo vyrobené na bázi disperze polyvinylacetátu ve vodě. Netoxický, nehořlavý. Je vhodný pro lepení montážních spojů, lepení dřeva, papíru, kartónu a jiného savého materiálu.</p>

7.4.2 Plnění sypké směsi do formy

Po prvních namíchání směsi (receptura 1) se trojforma o rozměrech vzorku 40x40x160 mm umístila do sušárny o teplotě 90°C po dobu 30 minut s cílem zapečení jednotlivých složek do sebe bez použití pojiva. K tomu ale nedošlo, směs byla spíše nakypřená a po odformování nedržela tvar a rozpadla se. Vzorek byl tudíž dále neměřitelný.

V další fázi výzkumu se směs na 10 minut smíchala s vodou (receptura 2R), pak byla přebytečná voda vyždímána a zavlhlá směs vložena do formy a zhuštěna. Na horní plochu bylo umístěno osmi kilové závaží, které směs stlačilo. Poté se opět vzorek vložil do sušárny (teplota měřen pomocí termočlánku). Teplota směsi dosahovala teploty okolo 90°C po dobu 15 minut. Po odformování vzorek držel tvar, ale při manipulaci se znovu rozsypal.

Směs byla ponechána delší dobu v sušárně za stejné teploty a zatížení. Po 45 minutách byl vzorek opět vytažen, vzorek držel tvar i při manipulaci, avšak je stále křehký, ale byl použitelný pro další měření.



Obrázek 25: Termicky vyrobené vzorky (receptura 2)

Druhou variantou, s kterou jsem pracoval, bylo smíchání směsi disperzním lepidlem (receptura 3). Směs se musela smíchat s vodou pro lepší propojení složek s lepidlem. Tato směs byla ukládána do formy, a druhý den odformována. Nedošlo však ke spojení částic, vzorek byl stále mokrá a nedalo se s ním manipulovat. Tato směs tedy byla uložena přímo do dutin tvarovky.

7.4.3 Plnění směsi do keramických dutin

Sypká směs PUR granulátu a EPS (receptury 1, 2) byla plněna do dutin tvarovek pýcháním. Tvarovka byla pak umístěna do klimatizační komory o teplotě 95 °C po dobu 30 minut, poté byla tvarovka vyjmuta, ale směs se stále sypala z tvarovky.

Směs v dutinách se znovu stlačila, zároveň se navýšila teplota klimatizační komory na 120 °C po dobu 60 minut. Tvarovka po této době byla sypká, směs stále vypadávala, tudíž tento pokus v rámci laboratorního vybavení nebyl úspěšný. Nelze však jednoznačně říct, že tento postup by nefungoval strojně ve výrobě, při vhodně zvolené technologii, kde by došlo k intenzivnímu propaření směsi a zároveň vyvození tlaku na směs v dutině.

S touto směsí jsem pracoval i dále, bylo použito pojivo - disperzní lepidlo (receptura 3R). Lepidlo bylo ředěno vodou v poměru 1:1, množství lepidla bylo zvoleno tak, aby se jednotlivá zrna obalila filmem naředěného pojiva. Jedná se tedy o mokrá technologický způsob, kdy byla připravená směs vsypána do dutin a následně zhutněna. Cihelný stěp vodu absorboval do svých stěn, a tato směs držela bez problému v dutinách tvarovek.



Obrázek 26: Tvarovky vyplněné sypkou směsí PUR a EPS -receptura 1, bez lepidla - receptura 2, s lepidlem - receptura 3(zleva)

Za účelem získat směs z dutiny pro další měření, byla tvarovka rozřezána. I přes šetrné zacházení se směs drolila, neměla rovný povrch, proto se s ní další měření neprovádělo.

7.4.4 Stanovení sypné hmotnosti

Sypná hmotnost byla stanovena dle ČSN EN 1097-3. Přehled naměřených a vypočítaných hodnot je uvedený v následující tabulce:

Počet měření	V _v	PUR granulát		EPS granulát	
		m'	ρ _s	m'	ρ _s
	[m ³]	[kg]	[kg.m ⁻³]	[kg]	[kg.m ⁻³]
1	0,001	0,0374	37,4	0,0149	14,9
2		0,0415	41,5	0,0122	12,2
3		0,0387	38,7	0,0135	13,5
Průměr		0,0392	39,2	0,0135	13,5

Tabulka 17: Stanovení sypné hmotnosti PUR a EPS granulátu

Sypná hmotnost PUR granulátu byla stanovena na $39,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a sypná hmotnost polystyrenu EPS je $13,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

7.4.5 Stanovení tloušťky, rozměrů a objemové hmotnosti

Stanovení rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti bylo stanoveno dle norem ČSN EN 823, ČSN EN 12085, ČSN EN 1602. Měření bylo provedeno na třech vzorcích (receptura 2) o rozměrech 40x40x160 mm při termickém zpracování a zatížení popsanych v odstavci 7.4.2 a sypané směsi (receptura 1) vpěchované do formy o rozměrech 300x300x50 mm.

Vzorek č.	m	l	b	h	ρ _v	ρ průměr
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg.m ⁻³]	[kg.m ⁻³]
1R.1	126,34	300,12	299,86	49,98	28,1	
		300,08	299,93	50,09		
		300,10	299,90	50,04		
2R.1	15,27	161,51	40,1	32,65	71,5	60,9
		160,12	39,76	33,89		
		160,82	39,93	33,27		
2R.2	11,87	160,16	40,01	38,18	48,4	
		160,23	39,96	38,44		
		160,20	39,99	38,31		
2R.3	13,06	157,54	40,65	32,75	62,9	
		157,73	40,54	32,11		
		157,64	40,60	32,43		

Tabulka 18: Stanovení rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti

Vzorky, které byly zatíženy a termicky zahřívány po určitou dobu mají průměrnou objemovou hmotnost $60,9 \text{ kg.m}^{-3}$. U volně sypané směsi, se kterou jsme pracovali při vyplňování je objemová hmotnost $28,1 \text{ kg.m}^{-3}$.

7.4.6 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Stanovení součinitele tepelné vodivosti pomocí metody horkého drátu v souladu s ČSN EN ISO 8894-1 proběhlo na třech vzorcích o rozměrech $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ při termickém zpracování a zatížení popsaných v *odstavci 7.4.2*. Dále byla měřena směs volně sypaná do rámečku o rozměrech $300 \times 300 \times 50 \text{ mm}$ (dle ČSN EN 12667, ČSN 72 7012 - 3 a ISO 8301)

Vzorek č.	ρ	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	$\lambda_{\text{průměr}}$
	$[\text{kg.m}^{-3}]$	$[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$					
1R.1	28,1	0,0326	0,0333	0,0338	0,0328	0,0333	0,0332
2R.1	71,5	0,0374	0,0407	0,0383	0,0389	0,0381	0,0387
2R.2	48,4	0,0366	0,0369	0,0374	0,0369	0,0375	0,0371
2R.3	62,9	0,0384	0,0394	0,0391	0,0394	0,0392	0,0391

Tabulka 19: Stanovení součinitele tepelné vodivosti u vyrobených vzorků

Trámce (receptura 2), které byly zatíženy a termicky po určitou dobu zpracovány se pohybují v rozmezí hodnot $0,0371 - 0,0331 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, o něco lépe vyšla směs volně sypaná (receptura 1) s hodnotou $0,0332 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

7.4.7 Stanovení tepelných vlastností tvarovek

Dále byl proveden výpočet tepelných vlastností tvarovek vyplněných izolanty na bázi PUR granulátu a EPS dle ČSN EN 1745. Přehled vypočítaných tepelných hodnot je uvedený v následujících tabulkách:

		Součinitel tepelné vodivosti izolační výplně $[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$			
		2R.1	2R.2	2R.3	1R.1
		0,0387	0,0371	0,0391	0,0332
Součinitel tepelné vodivosti střeby $[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	0,275	0,1707	0,1666	0,1717	0,1564
	0,3	0,1773	0,1731	0,1783	0,1628
	0,325	0,1836	0,1794	0,1847	0,169
	0,35	0,1899	0,1856	0,191	0,175
	0,375	0,196	0,1917	0,1971	0,181

Tabulka 20: Přehled vypočítaných hodnot součinitele prostupu tepla $U [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$ u pálených zdicích prvků vyplněných izolantem na bázi PUR granulátu a EPS

		Součinitel tepelné vodivosti izolační výplně [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]			
		2R.1	2R.2	2R.3	1R.1
		0,0387	0,0371	0,0391	0,0332
Součinitel tepelné vodivosti střepu [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,275	5,6932	5,8374	5,6591	6,2289
	0,3	5,4752	5,612	5,4435	5,9775
	0,325	5,2816	5,4091	5,2492	5,7522
	0,35	5,1009	5,2229	5,0706	5,5493
	0,375	4,937	5,0515	4,9086	5,3599

Tabulka 21: Přehled vypočítaných hodnot tepelných odporů R [m².K¹.W⁻¹] u pálených zdicích prvků vyplněných izolantem na bázi PUR granulátu a EPS

		Součinitel tepelné vodivosti izolační výplně [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]			
		2R.1	2R.2	2R.3	1R.1
		0,0387	0,0371	0,0391	0,0332
Součinitel tepelné vodivosti střepu [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,275	0,0773	0,0754	0,0778	0,0706
	0,3	0,0804	0,0784	0,0808	0,0736
	0,325	0,0833	0,0813	0,0838	0,0765
	0,35	0,0863	0,0842	0,0868	0,0793
	0,375	0,0891	0,0871	0,0896	0,0821

Tabulka 22: Přehled vypočítaných hodnot ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti λ_{eq} [W.m⁻¹.K⁻¹] u pálených zdicích prvků vyplněných izolantem na bázi PUR granulátu a EPS

Jak je z výše uvedených výsledků patrné keramické tvarovky vyplněné partikulární směsí PUR a EPS granulátu vykazují poměrně dobré tepelně izolační vlastnosti, hodnota tepelného odporu se pohybuje v rozmezí 4,9 až 6,22 m².K¹.W⁻¹ v závislosti na druhu vyrobené receptury a součiniteli tepelné vodivosti keramického střepu. Z pohledu tepelně izolačních vlastností se jako nejlepší jeví vzorek 1R.1 (receptura 1), což je výchozí směs bez termického zpracování.

8 Závěr

Cílem diplomové práce byl vývoj tepelně izolačních tvarovek pro zděné konstrukce s integrovanou tepelnou izolací. Pro praktickou část práce byly zvoleny na trhu běžně dostupné PUR „trubičkové“ pěny a sypké směsi odpadní PUR pěny a odpadního EPS.

U prvně zmiňované varianty se muselo s každou pěnou (kapitola 7.2) při vyfoukávání dutin pracovat zcela odlišně. Bylo zapotřebí aplikovat různé množství pěny (kapitola 7.3.3), pro vyplnění všech dutin, dále se musel povrch tvarovek očistit, nebo navlhčit, aby se odstranil veškerý prach z technologického procesu a tím se zlepšila přídržnost pěny k povrchu keramického střepe. Pokud se budou tyto pěny dále využívat, je důležité dávkování, aby nedocházelo při nadbytečném množství k nežádoucímu nadzvedávání ložných ploch tvarovek při výstavbě jednovrstvého obvodového pláště způsobenou rozpínáním pěny. Tvarovky typu 44 - T vyplněné PUR pěnou vykazují velmi dobré tepelně izolační vlastnosti. Výsledné hodnoty součinitele prostupu tepla U se pohybují v daném rozmezí v závislosti na druhu PUR pěny a součiniteli tepelné vodivosti keramického střepe (kapitola 7.1.11). Nejlépe se jeví pěna č. 1 – Montážní pěna SILVERLINE **0,14 – 0,16** W.m⁻².K⁻¹ (nejnižší hodnota počítána pro součinitel tepelné vodivosti střepe 0,275 W.m⁻¹.K⁻¹), pěna č. 2 - Dvousložková pěna Den Braven **0,14 – 0,16** W.m⁻².K⁻¹ a pěna č. 8 – Montážní pěna 750 Den Braven v rozmezí **0,14 – 0,17** W.m⁻².K⁻¹. Podle požadavkové normy ČSN 73 0540 výše uvedené výsledky splňují požadované hodnoty součinitele prostupu tepla $U_N = 0,3$ W.m⁻².K⁻¹ platící od 1. 1. 2013.

Bylo provedeno porovnání tohoto typu tvarovek s již nabízeným sortimentem na českém trhu. Vyvíjené tvarovky dosahují lepších tepelněizolačních vlastností oproti tvarovkám o tloušťce zdiva 440 mm s integrovanou minerální vlnou ve velkoobjemových dutinách (hodnota $U = 0,17$ W.m⁻².K⁻¹[40]) a srovnatelných s tvarovkami o velkém počtu malých dutin plněných polystyrénem ($U = 0,14$ W.m⁻².K⁻¹[39]).

Samotné vyplňování dutin keramických tvarovek běžně dostupnou PUR pěnou je podle grafu 13 poměrně nákladná záležitost. Z grafu je patrné, že nejpříjemnější cenovou variantou je pěna číslo 8 - montážní pěna 750 Den Braven, naopak aplikace pěny č. 2 dvoukomponentní DEN Braven je z důvodu vysokých nákladů nejméně vhodná.

Vyplňování dutin by probíhalo přímo na stavbě, pěna by byla dodávána v objemnějších lahvích pro výplň více tvarovek najednou, cena izolantu by se tak na jednu tvarovku mohla snížit až o 30 %. Pro srovnání se stávající tvarovka s integrovanou minerální vlnou Porothersm 42,5 T Profi cenově pohybuje kolem částky 104,90 Kč, prázdná tvarovka

44 Profi kolem 62,10 Kč (42,8 Kč na izolaci). Při snížení ceny (o 30%) a použití nejlevnější varianty PUR pěny se tvarovka cenově srovnatelná se stávajícím sortimentem.

Dalším krokem bylo ověření mechanických vlastností. Byly zkoušeny tvarovky s výplní a bez výplně. Všechny tvarovky byly zaříděny do pevnostní třídy P6. Jedná se o nižší pevnostní třídu, běžně se výrobky dodávají v pevnostní třídě P8 a výše (viz kapitola 3.3). Nedošlo tedy k navýšení pevnostní třídy u tvarovek s integrovanou izolací oproti prázdným. Ovšem k malým změnám zde došlo, jak je vidět z grafu 12 tvarovky s výplní se chovaly zcela odlišně při zkoušení pevnosti v tlaku, kdy držely tvar i při porušení vzorku naopak tvarovky nevyplněné měly tendenci roztržít se (explodovat). Většina vyplněných tvarovek vykazovala vyšší hodnoty pevnosti v tlaku (tabulka 11) než nevypěněné tvarovky, u pěny č. 9 je to 17,4 %, u pěny č. 5 byl nárůst pevnosti o 12,8 % a u pěny č. 2 o 11,4 %. U pěny č. 11 se neprojevovalo žádné zvýšení. Na mechanické vlastnosti byla vybrána vždy jedna tvarovka se zvolenou PUR pěnou, pro přesnější závěr by bylo potřeba většího souboru tvarovek.

Druhá část byla zaměřena na práci odpadní PUR pěny a odpadního EPS v mísicím poměru 1:1. Celkově byly vytvořeny tři receptury, první byla suchá bez pojiva, do druhé receptury byla přimíchána voda a třetí receptura byla smíchána s vodou a lepidlem. Receptury byly postupně plněny do tvarovek 44 - T, ve všech případech se směs do dutin přechovala ručně. Tvarovky byly bez přídavku lepidla (receptury 1, 2, viz kapitola 7.2) termicky zahřívány až na teplotu 120 °C po dobu 60 minut. Směs ve tvarovce byla sypká, stále vypadávala, tudíž tento pokus v rámci laboratorního vybavení nebyl úspěšný. Nelze však jednoznačně říct, že tento postup by nefungoval strojně ve velkovýrobě, při vhodně zvolené technologii, kde by došlo k intenzivnímu propaření směsi (obdobně jako v kapitole 5.3.1) a zároveň vyvození tlaku na směs v dutině. Tato partikulární směs se také může plnit přímo na stavbě pomocí plnicího rámečku (viz kapitola 5.3.2). Dalším pokusem bylo smíchání směsi lepidlem (receptura 3) ředěným vodou v poměru 1:1, množství lepidla bylo zvoleno tak, aby se jednotlivá zrna obalila filmem naředěného pojiva. Cihelný střep absorboval vodu z připravené směsi do svých stěn, a tato směs držela bez problému v dutinách tvarovek. Tvarovky vyplněné suchou partikulární směsí PUR a EPS granulátu (receptura 1) vykazují také velmi dobré tepelně izolační vlastnosti. Výsledné hodnoty součinitele prostupu tepla U se pohybují v daném rozmezí v závislosti na součiniteli tepelné vodivosti keramického střepu.

Součinitel prostupu tepla výsledné tvarovky se pohybuje v rozmezí **0,16 – 0,18** W.m⁻².K⁻¹ (nejnižší hodnota počítána pro součinitel tepelné vodivosti střepe 0,275 W.m⁻¹.K⁻¹), tyto hodnoty rovněž vyhovují dle ČSN EN 73 0540 požadované hodnotě $U_N = 0,3$ W.m⁻².K⁻¹.

Vyvíjené tvarovky se po tepelně izolační stránce vyrovnávají požadavkům současného trhu.

Obě zkoušené varianty se jeví jako perspektivní z hlediska tepelně izolačních vlastností, avšak důležitou roli bude hrát ekonomická stránka konečných produktů.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Cihlářský lexikon, Cihlářský svaz Čech a Moravy – 2. vydání, 2007
- [2] Vlhkostní a tepelné vlastnosti lehčeného střepe. *Stavební obzor*. 2012, č. 2.
- [3] Vliv výplňového materiálu na tepelně izolační vlastnosti děrovaných cihel. *Stavební obzor*. 2012, č. 5.
- [4] Břicháček, Pavel. Možnosti využití odpadů z textilního průmyslu při výrobě novodobých izolačních materiálů. Brno, 2012. 61 s., 65 s. příl. Bakalářská práce.
- [5] Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon), 2006
- [6] PYTLÍK, Petr. *Vlastnosti a užití stavebních výrobků*. Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 80-214-1123-6.
- [7] Vyhláška č. 268/2009 Sb., o technických požadavcích na stavby, 2009
- [8] Zákon č. 258/ 2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů
- [9] Zákon č. 102/2001 Sb., o obecné bezpečnosti výrobků a o změně některých zákonů (zákon o obecné bezpečnosti výrobků)
- [10] Zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky, 1997
- [11] Nařízení vlády 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky
- [12] Vyhláška 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb, 2008
- [13] Zákon č.406/200 Sb., o hospodaření energií, ve znění pozdějších předpisů
- [14] Vyhláška č. 148/2007 energetická náročnost budov
- [15] Svoboda, L. a kolektiv. *Stavební hmoty*. Bratislava: Jagamedia, 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [16] Zach, J., Brožovský, J., Hroudová, J., Sedlmajer, M. development of ceramic blocks for masonry construction with thermal insulation filling on the basis of easily renewable raw materials and by-products. 15 th international Brick and Block masonry Conference. Florianópolis, Brazil, 2012
- [17] Novák, Vítězslav. Návrh vhodných alternativních surovin pro výrobu super izolačních keramických tvarovek. Brno, 2012. 52 s. Bakalářská práce.
- [18] Veleba, Petr. Navrhování a realizace staveb z cihelného zdiva POROTHERM. *Časopis stavebnictví*. 06-07/09.
- [19] Sokolář, R. Speciální keramika: Cihlářská výroba. Studijní opory VUT FAST Brno, 2006

- [20] Sokolář, R. Keramika. Studijní opory VUT FAST Brno.
- [21] Zach, J., Sedlmajer, M., Hroudová, J. Development of masonry blocks units with thermal insulation fillings on the basis of secondary raw materials. Mezinárodní konference enviBUILD: budovy a prostředí, 2012
- [22] Heinrich, Pavel. Tepelně technické parametry cihel – minulost, současnost a budoucnost. Heluz cihlářský průmysl. [online]. 2.4.2012 Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/8439-tepelne-technicke-parametry-cihel-minulost-soucasnost-a-budoucnost>
- [23] Heinrich, Pavel. Navrhování zděných konstrukcí z cihel HELUZ Family 50 2in1: Heluz cihlářský průmysl. [online]. 3.8.2011. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/7699-navrhovani-zdenych-konstrukci-z-cihel-heluz-family-50-2in1>
- [24] Drochytka, R. Lehké stavební látky. Studijní opory VUT FAST Brno. 2006
- [25] Drochytka, R. Plastické látky, Studijní opory VUT FAST Brno. 2007
- [26] SOKOLÁŘ, R. Současné pálené zdící prvky pro vnější obvodové zdivo a jejich použití. In: [Http://www.asb-portal.cz/](http://www.asb-portal.cz/) [online]. 25.5.2010. 2010. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/cihly-tvarnice/soucasne-palene-zdici-prvky-pro-vnejsi-obvodove-zdivo-a-jejich-pouziti-1976.html>
- [27] Šťastník, S., Zach, J.. *Stavební akustika a zvukoizolační materiály*. Brno: CERM, 2002, 209 s. ISBN 80-214-2117-7.
- [28] Šťastník, S., Zach, J. *Zkoušení izolačních materiálů*. Brno: CERM, 2002, 95 s. ISBN 80-214-2253-X.
- [29] Sokolář, R. Papírenský kal jako lehčivo cihlářského střepu. *Stavební obzor*. 2010, č. 10.
- [30] Ficher, A. Ziegelfüllanlagen für innovative Produkte mit Mehrwert. *Ziegelindustrie International*. 2011, č. 3.
- [31] Perlitgefüllte Ziegel – der Siegeszug von der Innovation zum Sortiment, Interview mit Dipl.-Kfm. Johannes Edmüller, Geschäftsführer Schlagmann Baustoffwerke
- [32] Internetové stránky – tzb.info Vlastnosti expandovaného pěnového polystyrenu (EPS)
- [33] ČSN 73 0540 -1. *Tepelná ochrana budov - část 1: Terminologie*. Praha: ČNI, 2005.
- [34] ČSN 73 0540 -2. *Tepelná ochrana budov – část 2: Požadavky*. Praha: ÚNMZ, 2011
- [35] ČSN EN 771-1. *Specifikace zdících prvků - část 1: Pálené zdící prvky*. Praha: ČNI, 2004.
- [36] Schlagmann. [online]. 2012. Dostupné z: <http://www.schlagmann.de/http://www.wuk-industry.com/Ziegelverfuelleinrichtung.html>

- [37] Ziegelwerke Leipfinger-Bader [online]. Dostupné z: <http://www.leipfinger-bader.de/produkte/coriso/cor-iso-coriso/>
- [38] UNIPOR-Ziegel Marketing GmbH. Coriso-Technologie eroberet Russland. 01/12-08, www.unipor.de
- [39] Heluz, cihlářský průmysl [online]. Dostupné z: www.heluz.cz
- [40] Wienerberger [online]. 2012. Dostupné z: <http://www.wienerberger.cz/>
- [41] Keller [online]. Dostupné z: <http://www.keller.de/01de/02au/keramik.html>
- [42] Zach, J. Speciální izolace, Kombinované studium, 2011
- [43] ČSN EN 823 Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení tloušťky
- [44] ČSN EN 12085 Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – stanovení lineárních rozměrů zkušebních vzorků
- [45] ČSN EN 1602 Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení objemové hmotnosti. Praha: ČNI, 1998
- [46] ČSN 72 7012 – část 3: Metoda měřidla tepelného toku, metoda desky. Praha: ČNI, 2004 + ISO 8301.
- [47] ČSN EN 12667 Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků – stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku –výrobky o vysokém a středním tepelném odporu
- [48] ČSN EN ISO 8894 – část 1: Žárovzdorné materiály – stanovení tepelné vodivosti, metoda topného drátu (křížové uspořádání a uspořádání s odporovým teploměrem). 2011
- [49] ČSN EN 826: Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – zkouška tlakem.Praha: ČNI, 1998
- [50] ČSN EN 12087: Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – stanovení dlouhodobé nasákavosti při ponoření. Praha: ČNI, 1998
- [51] ČSN EN 772 Zkušební metody pro zdící prvky - část 1: Stanovení pevnosti v tlaku.2011
- [52] ČSN EN 772 Zkušební metody pro zdící prvky –část 16: Stanovení rozměrů.ÚNMZ. 2011
- [53] ČSN EN 1097 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva. 2011
- [54] SOUDAL: stavební chemie [online]. Dostupné z: www.soudal.cz
- [55] Den Braven. [online]. Dostupné z: www.denbraven.cz

Seznam tabulek

Tabulka 1: Součinitel tepelné vodivosti pálených cihel v závislosti na objem. hmotnosti	21
Tabulka 2: Vlastnosti polyuretanů	44
Tabulka 3: Vlastnosti EPS	45
Tabulka 4: Klasifikace pálených zdicích prvků podle pevnosti v tlaku	53
Tabulka 5: Přehled použitých pěn	58
Tabulka 6: Průměrné hodnoty pro stanovení tloušťky, lineárních rozměrů, objemové hmotnosti	61
Tabulka 7: Shrnutí změn pozorovaných na zkoušených vzorcích	61
Tabulka 8: Stanovení součinitele tepelné vodivosti	64
Tabulka 9: Naměřené hodnoty pro stanovení dlouhodobé nasákavosti při úplném ponoření	67
Tabulka 10: Naměřené rozměry tvarovek a stanovení pevnosti v tlaku	69
Tabulka 11: Přehled pevnostních charakteristik keramických tvarovek vyplněných různými vzorky PUR pěn a srovnání jejich mechanických vlastností oproti tvarovkám nevyplněným	70
Tabulka 12: Přehled vypočítaných hodnot součinitele prostupu tepla $U [W.m^{-2}.K^{-1}]$ u pálených zdicích prvků vyplněných PUR pěnou	71
Tabulka 13: Přehled vypočítaných hodnot tepelných odporů $R [m^2.K^{-1}.W^{-1}]$ u pálených zdicích prvků vyplněných PUR pěnou	71
Tabulka 14: Přehled vypočítaných hodnot ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti $\lambda_{eq} [W.m^{-1}.K^{-1}]$ u pálených zdicích prvků vyplněných PUR pěnou	71
Tabulka 15: Cenové porovnání pro výplň jedné tvarovky	73
Tabulka 16: Stanovení sypané hmotnosti PUR a EPS granulátu	76
Tabulka 17: Stanovení rozměrů, tloušťky a objemové hmotnosti	76
Tabulka 18: Stanovení součinitele tepelné vodivosti u vyrobených vzorků	77
Tabulka 19: Přehled vypočítaných hodnot součinitele prostupu tepla $U [W.m^{-2}.K^{-1}]$ u pálených zdicích prvků vyplněných izolantem na bázi PUR granulátu a EPS	77
Tabulka 20: Přehled vypočítaných hodnot tepelných odporů $R [m^2.K^{-1}.W^{-1}]$ u pálených zdicích prvků vyplněných izolantem na bázi PUR granulátu a EPS	78
Tabulka 21: Přehled vypočítaných hodnot ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti $\lambda_{eq} [W.m^{-1}.K^{-1}]$ u pálených zdicích prvků vyplněných izolantem na bázi PUR granulátu a EPS	78

Seznam obrázků

Obrázek 1: Závislost součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti tří cihlářských střepek s různou objemovou hmotností (A - 1960 kg.m^{-3} , B - 1850 kg.m^{-3} , C - 1750 kg.m^{-3})	22
Obrázek 2 : Rozměry a povrchové plochy	25
Obrázek 3: Zvyšování tloušťky zdiva v čase	27
Obrázek 4: příklady uspořádání dutin bloků	28
Obrázek 5: Technologické schéma výroby cihel	29
Obrázek 6: Brousící linka, detail fixace keramických tvarovek.....	32
Obrázek 7: řezání a ukládání kusové izolace.....	34
Obrázek 8: Pohled na celou plnicí linku.....	34
Obrázek 9: Detail vkládací šablony	35
Obrázek 10: Pohled na vkládací linku	36
Obrázek 11: Vkládací zařízení, (šablona, strojní mechanizace)	37
Obrázek 12: Pohled na hotové výrobky	37
Obrázek 13: Zásobník na polystyrén	38
Obrázek 14: Detail karuselu pro plnění tvarovek polystyrenem	39
Obrázek 15: Ruční plnění na stavbě	40
Obrázek 16: Fixace cihel a plnicí zařízení.....	41
Obrázek 17: Fáze plnění	41
Obrázek 18: Vytvrzování v sušícím zařízení.....	42
Obrázek 19: Schéma prováděných experimentálních prací	48
Obrázek 20: Nepovedený vzorek, nová forma, vyplnění nové formy pěnou (zleva).....	59
Obrázek 21: Vyplňování tvarovek PUR pěnou nenavlhčené tvarovky, navlhčené tvarovky, seřezání tvarovky (zleva).....	59
Obrázek 22: Možné vady při vyplňování - smršťení PUR pěny, nepravidelná struktura pěny v dutině, špatně zreagovaná pěna (zleva)	60
Obrázek 23: Tvarovka před zkouškou, tvarovka bez výplně po provedení zkoušky, tvarovka s výplní po provedení zkoušky (zleva)	70
Obrázek 24: Výpočtové rozložení teplotního pole (IR zobrazení) v páleném zdicím prvku Model 42,5 T – 7 při okrajových podmínkách: $\theta_1 = \theta_i = +21^\circ\text{C}$, $\theta_2 = \theta_e = -15^\circ\text{C}$ ($\lambda_{\text{střep}} = 0,250 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$; $\lambda_{\text{izolant, PUR1}} = 0,0278 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	72
Obrázek 25: Termicky vyrobené vzorky (receptura 2)	74

Obrázek 26: Tvarovky vyplněné sypkou směsí PUR a EPS -receptura 1, bez lepidla -
receptura 2, s lepidlem -receptura 3(zleva) 75

Seznam grafů

Graf 1: Křivka zrnitosti PUR 3-5 mm	56
Graf 2: Síťový rozbor EPS 3-5 mm.....	56
Graf 3: Změna objemové hmotnosti vzorků v čase.....	62
Graf 4: Změna tloušťky vzorků v čase	62
Graf 5: Změna hmotnosti v čase.....	62
Graf 6: Stanovení součinitele tepelné vodivosti	64
Graf 7: Vliv objemové hmotnosti na součinitel tepelné vodivosti λ	64
Graf 8: Pracovní diagramy zkoušených vzorků	66
Graf 9: Závislost objemové hmotnosti na napětí při 10 % deformaci.....	66
Graf 10: Dlouhodobá nasákavost vzorků při úplném ponoření.....	67
Graf 11: Závislost nasákavosti na objemové hmotnosti	68
Graf 12: Porovnání hodnot pevnosti v tlaku keramických tvarovek s intergrovanou izolací (modře) a bez izolace (zeleně).....	69
Graf 13: Cenové porovnání pro výplň jedné tvarovky	73

Seznam zkratk

ČSN	česká státní norma
EN	evropská norma
PUR	polyuretan
EPS	expandovaný polystyrén

Seznam příloh

Příloha 1: Požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla dle normy ČSN 73 0540 -2
Příloha 2: Požadavky na zvukovou izolaci v místnostech dle ČSN 73 0532
Příloha 3: Tolerance, odchylky rozměrů keramických výrobků
Příloha 4: Měření tloušťky, lineárních rozměrů, objemové hmotnosti
Příloha 5: Naměřené hodnoty při 10% deformaci tepelně technických výrobků

Příloha 1 - Požadované a doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla dle normy ČSN 73 0540 -2

Popis konstrukce	Součinitel prostupu tepla		
	[W/(m ² ·K)]		
	Požadované hodnoty	Doporučené hodnoty	Doporučené hodnoty pro pasivní budovy
	U _{N,20}	U _{rec,20}	U _{pas,20}
Stěna vnější	0,30 ¹⁾	těžká: 0,25 lehká: 0,20	0,18 až 0,12
Střecha strmá se sklonem nad 45°	0,3	0,2	0,18 až 0,12
Střecha plochá a šikmá se sklonem do 45° včetně	0,24	0,16	0,15 až 0,10
Strop s podlahou nad venkovním prostorem	0,24	0,16	0,15 až 0,10
Strop pod nevytápěnou půdou (se střechou bez tepelné izolace)	0,3	0,2	0,15 až 0,10
Stěna k nevytápěné půdě (se střechou bez tepelné izolace)	0,30 ¹⁾	těžké: 0,25 lehké: 0,20	0,18 až 0,12
Podlaha a stěna vytápěného prostoru přilehlá k zemině ^{4), 6)}	0,45	0,3	0,22 až 0,15
Strop a stěna vnitřní z vytápěného k nevytápěnému prostoru	0,6	0,4	0,30 až 0,20
Strop a stěna vnitřní z vytápěného k temperovanému prostoru	0,75	0,5	0,38 až 0,25
Strop a stěna vnější z temperovaného prostoru k venkovnímu prostředí	0,75	0,5	0,38 až 0,25
Podlaha a stěna částečně vytápěného prostoru přilehlá k zemině ⁶⁾	0,85	0,6	0,45 až 0,30
Stěna mezi sousedními budovami ³⁾	1,05	0,7	0,5
Strop mezi prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně	1,05	0,7	
Stěna mezi prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně	1,3	0,9	
Strop vnitřní mezi prostory s rozdílem teplot do 5 °C včetně	2,2	1,45	
Stěna vnitřní mezi prostory s rozdílem teplot do 5 °C včetně	2,7	1,8	
Výplň otvoru ve vnější stěně a strmé střeše, z vytápěného prostoru do venkovního prostředí, kromě dveří	1,5 ²⁾	1,2	0,8 až 0,6
Šikmá výplň otvoru se sklonem do 45°, z vytápěného prostoru do venkovního prostředí	1,4 ⁷⁾	1,1	0,9
Dveřní výplň otvoru z vytápěného prostoru do venkovního prostředí (včetně rámu)	1,7	1,2	0,9
Výplň otvoru vedoucí z vytápěného do temperovaného prostoru	3,5	2,3	1,7
Výplň otvoru vedoucí z temperovaného prostoru do venkovního prostředí	3,5	2,3	1,7
Šikmá výplň otvoru se sklonem do 45° vedoucí z temperovaného prostoru do venkovního prostředí	2,6	1,7	1,4

Popis konstrukce		Součinitel prostupu tepla		
		[W/(m ² ·K)]		
		Požadované hodnoty	Doporučené hodnoty	Doporučené hodnoty pro pasivní budovy
		U _{N,20}	U _{rec,20}	U _{pas,20}
Lehký obvodový plášť (LOP), hodnocený jako smontovaná sestava včetně nosných prvků, s poměrnou plochou průsvitné výplně otvoru	f _w ≤ 0,5	0,3 + 1,4·f _w	0,2 + f _w	0,15 + 0,85·f _w
f _w = A _w / A , v m ² /m ² ,				
kde				
A je celková plocha lehkého obvodového pláště (LOP), v m ² ;	f _w > 0,5	0,7 + 0,6·f _w		
A _w plocha průsvitné výplně otvoru včetně příslušných částí rámu v LOP, v m ² .				
Kovový rám výplně otvoru		-	1,8	1,0
Nekovový rám výplně otvoru ⁵⁾		-	1,3	0,9 – 0,7
Rám lehkého obvodového pláště		-	1,8	1,2
POZNÁMKY				
¹⁾ Pro jednovrstvé zdivo se nejpozději do 31.12.2012 připouští hodnota 0,38 W/(m ² K).				
²⁾ Nejpozději do 31.12.2012 se připouští hodnota 1,7 W/(m ² K).				
³⁾ Nemusí se vždy jednat o teplosměnnou plochu, ovšem s ohledem na postup výstavby a možné změny způsobu užívání se zajišťuje tepelné ochrana na uvedené úrovni.				
⁴⁾ V případě podlahového a stěnového vytápění se do hodnoty součinitele prostupu tepla započítávají pouze vrstvy od roviny, ve které je umístěno vytápění, směrem do exteriéru.				
⁵⁾ Platí i pro rámy využívající kombinace materiálů, včetně kovových, jako jsou například dřevo-hliníkové rámy.				
⁶⁾ Odpovídá výpočtu součinitele prostupu tepla podle ČSN 73 0540-4, (tj. bez vlivu zeminy), nikoli výslednému působení podle ČSN EN ISO 13370.				
⁷⁾ Nejpozději do 31.12.2012 se připouští hodnota 1,5 W/(m ² K).				

Příloha 2 - Požadavky na zvukovou izolaci v místnostech dle ČSN 73 0532

Č.	Hlučný prostor (místnost zdroje zvuku)	Požadavky na zvukovou izolaci			
		Stropy		Stěny	Dveře
		$R'_{w}, D_{nT,w}$	$\begin{matrix} L'_{n,w} \\ L'_{nT,w} \end{matrix}$	$R'_{w}, D_{nT,w}$	R_w
		[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
A. Bytové domy, rodinné domy – nejméně jedna obytná místnost bytu					
1	Všechny ostatní obytné místnosti téhož bytu	47	63	42	27
B. Bytové domy – obytné místnosti bytu					
2	Všechny místnosti druhých bytů, včetně příslušenství	53 52 ¹⁾	55 58 ¹⁾	53 52 ¹⁾	-
3	Společné prostory domu (schodiště, chodby, terasy, kočárkárny, sušárny, sklípky apod.)	52	55	52	32 ²⁾ 37 ³⁾
4	Průjezdy, podjezdy, garáže, průchody, podchody	57	48	57	-
5	Místnosti s technickým zařízením domu (výměňníkové stanice, kotelny, strojovny výtahů, strojovny VZT, prádelny apod.) s hlukem: $L_{A,max} \leq 80$ dB $80 < L_{A,max} \leq 85$ dB	57 ⁴⁾ 62 ⁵⁾	48 ⁴⁾ 48 ⁵⁾	57 ⁴⁾ 62 ⁵⁾	-
6	Provozovny s hlukem $L_{A,max} \leq 85$ dB: s provozem nejvýše do 22:00 h s provozem i po 22:00 h	57 62	53 48	57 62	-
7	Provozovny s hlukem $85 < L_{A,max} \leq 95$ dB s provozem i po 22:00 h	72 ⁵⁾	38 ⁵⁾	-	-
C. Terasové nebo řadové domy a dvojdomy – obytné místnosti bytu					
8	Všechny místnosti v sousedním domě	57	48	57	-
D. Hotely a zařízení pro přechodné ubytování – ložnicový prostor ubytovací jednotky					
9	Všechny místnosti druhých jednotek	52	58	47	42 ⁶⁾
10	Společně užívané prostory (chodby, schodiště)	52	58	45	32 27 ⁷⁾
11	Restaurace a jiné provozovny s provozem do 22:00 h	57	53	57	-
12	Restaurace a jiné provozovny s provozem i po 22:00h ($L_{A,max} \leq 85$ dB)	62	48	62	-
E. Nemocnice, zdravotnická zařízení – lůžkové pokoje, ordinace, pokoje lékařů, operační sály apod.					
13	Lůžkové pokoje, ordinace, ošetrovny, operační sály, komunikační a pomocné prostory (chodby, schodiště)	52	58	47 ⁸⁾	27
14	Hlučné prostory (kuchyně, technická zařízení budovy) $L_{A,max} \leq 85$ dB	62	48	62	-
F. Školy a vzdělávací instituce – učebny, výukové prostory					
15	Učebny, výukové prostory	52	58	47	-
16	Společné prostory, chodby, schodiště	52	58	47	32 27 ⁷⁾
17	Hlučné prostory (dílny, jídelny) $L_{A,max} \leq 85$ dB	55	48	52	-
18	Velmi hlučné prostory (hudební učebny, dílny, tělocvičny) $L_{A,max} \leq 90$ dB	60 ⁹⁾	48 ⁹⁾	57 ⁹⁾	-

Č.	Hlučný prostor (místnost zdroje zvuku)	Požadavky na zvukovou izolaci			
		Stropy		Stěny	Dveře
		$R'_{w}, D_{nT,w}$	$\frac{L'_{n,w}}{L'_{nT,w}}$	$R'_{w}, D_{nT,w}$	R_w
		[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
G. Administrativní a správní budovy, firmy – kanceláře a pracovní					
19	Kanceláře a pracovní s běžnou administrativní činností, chodby, pomocné prostory	47	63	37	27
20	Kanceláře a pracovní se zvýšenými nároky, pracovní vedoucích pracovníků ¹⁰⁾	52	58	45	32
21	Kanceláře a pracovní pro důvěrná jednání nebo jiné činnosti vyžadující vysokou ochranu před hlukem ¹⁰⁾	52	58	50	37

VYSVĚTLIVKY

- ¹⁾ Požadavek se vztahuje pouze na starou, zejména panelovou výstavbu, pokud neumožňuje dodatečná zvukově izolační opatření.
- ²⁾ Platí pro vstupní dveře z chodby do předsíně (vstupní haly) bytu, je-li chráněný prostor místností oddělen dalšími dveřmi.
- ³⁾ Platí pro vstupní dveře z chodby přímo do chráněné obytné místnosti bytu.
- ⁴⁾ Kromě splnění stanovených požadavků na vzduchovou a kročejovou neprůzvučnost mohou být nutná další opatření, kdy je nutné stroje a zařízení uložit, zavěsit či upravit tak, aby nedocházelo k šíření a přenosu zvuku konstrukcí (vibracemi) a instalacemi (rozvody médií, šachtami aj.) a k překročení hygienických limitů hluku ve vnitřních chráněných prostorech. V prokázaných případech, kdy zařízení nebude zdrojem hluku a vibrací, lze požadavky snížit o 5 dB. V opodstatněných případech se doporučuje provést předběžné posouzení pomocí akustické studie.
- ⁵⁾ Kromě splnění stanovených požadavků na vzduchovou a kročejovou neprůzvučnost mohou být nutná další opatření, kdy je nutné stroje a zařízení uložit, zavěsit či upravit tak, aby nedocházelo k šíření a přenosu zvuku konstrukcí (vibracemi) a instalacemi (rozvody médií, šachtami aj.) a k překročení hygienických limitů hluku ve vnitřních chráněných prostorech. Místnosti s provozním hlukem s dominantním obsahem nízkých kmitočtů nebo s tónovými složkami (např. hlučné strojovny, diskotéky apod.) se zásadně nedoporučuje situovat do blízkosti bytových jednotek. Zejména přenos nízkých kmitočtů nelze v běžných obytných budovách účinně omezit. V odůvodněných případech se doporučuje provést předběžné posouzení pomocí akustické studie. Provozovny s hlukem $L_{Amax} > 95$ dB se nemají umísťovat do obytných budov.
- ⁶⁾ Platí pro spojovací dveře mezi samostatnými ubytovacími jednotkami (např. dvojité nebo zádveří).
- ⁷⁾ Platí pro vstupní dveře, je-li chráněný prostor oddělen předsíní nebo zádveřím s dalšími dveřmi.
- ⁸⁾ U stěn s prosklenými částmi, přes které je nutný vizuální kontakt lze požadavek snížit o 5 dB a u celoplošných zasklení až o 10 dB (např. operační sály, JIP).
- ⁹⁾ Vzhledem k možnému přenosu nízkých kmitočtů mohou být nutná další opatření. Situace obvykle vyžaduje individuální posouzení.
- ¹⁰⁾ Požadavky platí rovněž mezi uvedenými pracovními a přilehlými chodbami, popř. pomocnými prostory.

Příloha 3 – Tolerance, odchylky rozměrů keramických výrobků

Kategorie	Mezní odchylky rozměrů (uvažuje se vyšší hodnota)
T1	$\pm 0,40 \cdot \sqrt{\text{jmenovitý rozměr [mm]}}$ nebo 3 mm
T1+	$\pm 0,40 \cdot \sqrt{\text{jmenovitý rozměr [mm]}}$ nebo 3 mm pro délku a šířku a současně $\pm 0,05 \cdot \sqrt{\text{jmenovitý rozměr [mm]}}$ nebo 1 mm pro výšku
T2	$\pm 0,25 \cdot \sqrt{\text{jmenovitý rozměr [mm]}}$ nebo 2 mm
T2+	$\pm 0,25 \cdot \sqrt{\text{jmenovitý rozměr [mm]}}$ nebo 2 mm pro délku a šířku a současně $\pm 0,05 \cdot \sqrt{\text{jmenovitý rozměr [mm]}}$ nebo 1 mm pro výšku
Tm	Odchylka deklarovaná výrobcem

Kategorie	Nejvyšší přípustná tolerance
R1	$\pm 0,6 \cdot \sqrt{\text{jmenovitý rozměr [mm]}}$
R1+	$\pm 0,6 \cdot \sqrt{\text{jmenovitý rozměr [mm]}}$ pro délku a šířku a 1 mm pro výšku
R2	$\pm 0,3 \cdot \sqrt{\text{jmenovitý rozměr [mm]}}$
R2+	$\pm 0,3 \cdot \sqrt{\text{jmenovitý rozměr [mm]}}$ pro délku a šířku 1 mm pro výšku
Rm	Tolerance deklarovaná výrobcem

Příloha 4 - Měření tloušťky, lineárních rozměrů, objemové hmotnosti vzorků.

označení vzorků	měřeno po odformování					měřeno po 3 dnech					měřeno po 7 dnech					měřeno po 12 dnech										
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [g]	ρ [kg.m ⁻³]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [g]	ρ [kg.m ⁻³]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [g]	ρ [kg.m ⁻³]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [g]	ρ [kg.m ⁻³]						
1.1	301,30	301,89	64,09	66,34	130,01	22,3	290,59	291,24	56,43	76,58	125,86	21,9	290,40	291,19	55,45	76,42	290,59	291,24	56,43	76,58	95,85	16,7				
	299,71	301,44	63,38	65,16			291,72	288,33	57,03	81,46			291,46	288,45	57,13	65,16							291,72	288,33	57,03	81,46
	302,31	301,62	61,35	66,75			292,23	290,94	56,73	79,98			291,86	290,85	56,82	66,75							292,23	290,94	56,73	79,98
	298,21	297,76	60,92	67,78			287,05	288,79	59,30	78,03			297,12	288,61	59,46	67,78							287,05	288,79	59,30	78,03
	300,38	300,68	64,47	290,40			289,83	68,19	292,71	289,78			63,12	290,40	289,83	68,19										
1.2	251,13	293,04	62,02	61,93	120,23	25,7	251,16	293,11	61,99	61,39	117,61	25,2	251,20	294,23	70,12	61,41	250,17	294,00	61,99	61,56	117,85	25,2				
	255,94	293,67	72,68	60,61			255,80	294,32	72,66	60,65			255,78	294,58	72,59	60,46							256,46	296,86	72,59	60,44
	256,67	294,64	55,00	60,68			256,73	294,67	54,32	60,88			256,68	296,77	54,36	60,85							254,33	294,73	54,63	60,79
	254,73	297,59	58,55	67,66			254,66	297,68	58,54	67,55			253,21	297,32	58,43	67,70							253,20	297,36	58,70	67,47
	254,62	294,74	62,39	254,59			294,95	62,25	254,22	295,73			63,24	253,54	295,74	62,27										
1.3	301,66	295,44	50,57	51,97	128,13	27,9	298,06	294,00	46,11	44,09	123,89	29,7	297,84	288,05	47,33	47,68	297,10	287,51	48,29	47,94	123,52	29,3				
	300,85	296,88	50,38	51,76			297,80	291,99	48,86	46,02			297,83	288,42	46,01	43,25							297,79	290,25	47,67	52,64
	301,08	298,78	51,24	51,43			298,36	290,09	48,71	52,54			296,98	291,26	47,18	49,14							296,56	293,14	46,08	51,91
	300,62	298,65	50,92	51,34			297,59	287,43	48,99	49,38			298,07	295,41	48,61	45,86							298,13	293,45	48,59	45,83
	301,05	297,44	51,20	297,95			290,88	48,09	297,68	290,79			46,88	297,40	291,09	48,62										
1.4	301,31	302,05	49,77	55,25	132,96	28,2	296,80	301,52	46,09	50,41	129,97	30,0	293,22	301,12	47,15	46,92	296,06	301,24	50,94	45,95	129,74	30,6				
	299,45	301,08	49,76	53,67			297,65	300,59	46,49	50,62			297,14	301,39	49,83	46,04							292,31	298,42	48,81	46,70
	300,19	302,01	52,32	51,74			298,88	301,09	47,30	49,05			297,51	300,71	49,92	46,49							297,25	300,35	50,52	45,70
	301,26	299,30	51,38	52,69			299,70	297,45	46,95	49,82			298,53	301,13	49,90	44,68							298,24	301,06	47,73	45,41
	300,55	301,11	52,07	298,26			300,16	48,34	296,60	301,09			47,62	295,97	300,27	47,72										
1.5	300,04	294,51	50,51	51,33	134,16	28,2	296,60	291,91	47,51	45,04	129,14	30,2	296,83	292,27	50,14	47,01	297,51	296,60	47,54	48,13	128,64	30,1				
	300,33	297,56	50,33	51,26			297,14	294,38	47,80	49,34			296,34	293,75	50,46	48,23							297,72	296,51	49,73	48,07
	299,65	297,98	53,74	51,80			297,88	296,22	50,76	49,32			297,21	295,36	45,83	52,13							296,96	296,88	46,82	52,13
	299,61	298,80	50,80	67,66			297,77	297,66	48,24	51,69			297,86	295,84	46,56	46,61							296,98	293,94	50,10	46,52
	299,91	297,21	53,43	297,35			295,04	48,71	297,06	294,31			48,37	297,29	295,98	48,63										
2.1	173,84	302,33	42,44	43,93	101,37	43,5	173,11	305,42	45,11	43,48	100,82	43,0	173,08	305,37	45,20	43,50	173,00	305,37	45,20	43,52	100,22	42,7				
	175,20	306,40	44,13	43,56			174,58	303,51	44,90	45,00			174,58	303,53	44,69	45,01							174,56	303,53	44,69	45,00
	175,52	300,90	45,15	44,21			175,23	299,52	44,72	44,78			175,20	299,45	44,79	44,81							175,20	299,45	44,80	44,82
	174,89	302,45	43,82	44,46			174,45	302,06	44,47	43,40			174,39	301,94	44,54	43,39							174,43	301,94	44,55	43,39
	174,86	303,02	43,96	174,34			302,63	44,48	174,31	302,57			44,49	174,30	302,57	44,50										
2.2	298,17	299,10	46,37	47,25	125,64	30,3	296,79	298,84	45,00	46,60	122,66	29,7	296,70	298,80	44,89	46,60	296,69	298,80	44,89	46,59	122,5	29,7				
	295,37	298,40	45,32	46,65			294,28	297,85	47,39	45,51			294,36	297,79	47,39	45,52							294,39	297,79	47,39	45,52
	295,04	298,70	47,91	47,42			295,00	298,72	47,81	47,42			294,97	298,70	47,81	47,44							294,95	298,70	47,80	47,44
	296,40	297,30	47,98	46,95			296,34	297,35	48,00	46,90			296,40	297,38	47,90	46,87							296,36	297,35	47,88	46,87
	296,25	298,38	46,98	295,60			298,19	46,83	295,61	298,17			46,80	295,60	298,16	46,80										
2.3	299,00	296,73	45,42	48,23	137,57	32,5	298,66	297,56	48,56	46,67	135,42	32,2	298,60	297,60	48,65	46,58	298,60	297,53	48,66	46,59	135,05	32,1				
	298,46	297,43	48,28	46,92			298,39	296,18	47,86	47,33			298,30	296,20	47,90	47,40							298,37	296,11	47,88	47,41
	298,75	298,51	48,91	47,54			298,80	298,50	45,68	47,54			298,67	298,57	45,70	47,50							298,60	298,48	45,71	47,49
	298,66	298,29	48,20	46,93			298,62	298,32	48,24	46,90			298,58	298,36	48,25	46,98							298,62	298,40	48,30	46,89
	298,72	297,74	47,55	298,62			297,64	47,35	298,54	297,68			47,37	298,55	297,63	47,37										

3.1	299,02	295,48	60,68	62,29	121,01	22,4	291,44	288,89	59,84	54,56	115,93	24,3	290,68	289,00	59,78	54,60	113,23	23,7	290,70	289,18	59,82	54,67	113,4	23,8
	298,58	297,02	61,12	61,81			292,49	290,03	57,31	54,62			291,77	289,82	57,39	54,72			291,83	289,90	57,41	54,70		
	297,60	297,77	59,92	61,17			292,41	291,87	58,82	51,41			292,45	291,75	58,88	50,98			292,56	291,48	58,93	51,01		
	296,49	295,80	60,08	61,45			293,14	289,70	58,13	56,07			293,02	289,62	58,20	55,96			292,82	289,57	58,17	55,96		
	297,92	296,52	61,07				292,37	290,12	56,34				291,98	290,05	56,31				291,98	290,03	56,33			
3.2	292,03	295,60	46,08	47,61	126,13	32,4	298,72	296,27	49,94	49,40	125,19	28,3	293,84	295,83	47,19	45,46	124,72	31,6	293,73	295,89	47,23	45,53	124,43	31,5
	294,63	294,28	45,93	40,54			299,02	297,20	49,93	50,06			294,51	297,03	47,45	44,70			294,56	296,89	47,53	44,71		
	292,62	294,67	48,10	40,86			298,55	298,04	48,83	51,10			292,39	294,91	43,93	42,65			292,45	294,79	43,87	42,64		
	295,04	292,84	48,73	42,46			299,31	299,74	49,17	49,61			296,76	293,49	49,27	42,75			296,81	293,38	49,30	42,62		
	293,58	294,35	45,04				298,90	297,81	49,75				294,38	295,32	45,42				294,39	295,24	45,43			
3.3	298,45	299,16	49,41	49,58	131,44	29,9	299,70	295,59	46,29	43,08	128,79	31,0	299,70	295,59	46,29	43,08	128,46	31,0	299,75	295,48	46,29	43,01	128,56	31,0
	298,38	296,03	49,34	48,88			300,38	298,57	47,90	41,82			300,38	298,57	47,90	41,82			300,42	298,59	47,91	41,82		
	298,62	297,65	48,73	50,78			299,05	298,39	50,95	48,41			299,05	298,39	50,95	48,41			298,87	298,44	50,96	48,43		
	299,01	296,19	49,16	49,85			298,49	299,37	49,08	44,65			298,49	299,37	49,08	44,65			298,57	299,33	49,10	44,66		
	298,62	297,26	49,47				299,41	297,98	46,52				299,41	297,98	46,52				299,40	297,96	46,52			
3.4	294,33	296,43	47,36	45,56	142,26	36,0	294,33	296,43	47,36	45,56	140,55	35,6	294,33	296,43	47,36	45,56	140,71	35,6	294,30	296,50	47,43	45,56	140,6	35,6
	296,87	297,66	46,66	44,22			296,87	297,66	46,66	44,22			296,87	297,66	46,66	44,22			297,04	297,60	46,66	44,24		
	295,79	297,33	45,29	42,77			295,79	297,33	45,29	42,77			295,79	297,33	45,29	42,77			295,84	297,39	45,30	42,76		
	295,13	297,63	45,42	42,39			295,13	297,63	45,42	42,39			295,13	297,63	45,42	42,39			295,24	297,68	45,43	42,39		
	295,53	297,26	44,96				295,53	297,26	44,96				295,53	297,26	44,96				295,61	297,29	44,97			

4.1	296,33	295,86	61,60	74,97	127,16	21,1	291,44	288,89	59,84	54,56	115,93	24,3	271,09	282,74	69,93	67,33	106,52	20,6	271,44	288,49	65,56	67,57	106,6	20,4
	293,01	293,81	62,77	79,65			292,49	290,03	57,31	54,62			275,21	285,32	67,66	58,50			270,83	287,92	66,54	58,26		
	297,97	295,40	61,68	83,57			292,41	291,87	58,82	51,41			284,97	286,57	65,20	63,52			278,46	284,74	59,26	71,28		
	296,03	294,70	61,61	65,50			293,14	289,70	58,13	56,07			284,76	288,02	63,83	63,42			284,96	285,10	64,73	73,27		
	295,84	294,94	68,92				292,37	290,12	56,34				279,01	285,66	64,92				276,42	286,56	65,81			
4.2	278,51	289,21	43,10	34,76	91,67	28,4	299,58	296,09	43,16	50,79	90,73	20,8	283,22	290,14	45,80	32,54	90,53	26,7	283,31	290,20	45,81	32,54	89,94	26,6
	285,94	291,81	41,99	34,06			293,98	297,99	46,40	50,40			286,03	289,87	45,32	35,79			286,00	289,93	45,40	35,80		
	286,22	288,42	41,87	37,18			290,87	299,50	51,94	51,86			289,09	292,89	42,17	37,17			289,10	292,80	42,17	37,17		
	291,88	293,07	42,87	34,96			295,17	297,64	50,64	52,14			291,65	293,71	43,63	40,63			291,70	293,62	43,65	40,58		
	285,64	290,63	38,85				294,90	297,81	49,67				287,50	291,65	40,38				287,53	291,64	40,39			
4.3	287,08	290,61	42,43	42,51	122,48	33,9	295,85	296,52	49,39	49,72	120,75	29,6	284,14	294,01	42,97	33,64	118,21	36,7	284,20	294,94	43,09	33,66	117,19	36,3
	289,00	293,03	44,03	43,63			294,92	296,18	46,10	50,24			287,61	290,10	42,15	35,30			287,67	290,18	42,13	35,31		
	289,23	297,74	40,66	42,71			289,48	296,61	44,81	43,48			288,20	291,85	40,74	34,91			288,28	291,91	40,76	34,90		
	289,90	294,94	41,56	42,61			293,64	295,75	47,84	44,00			287,29	289,98	45,96	32,92			287,34	289,92	45,97	32,86		
	288,80	294,08	42,52				293,47	296,27	46,95				286,81	291,49	38,57				286,87	291,74	38,58			
4.4	298,71	294,46	47,80	49,42	95,55	22,2	295,68	291,63	43,32	46,33	93,81	24,2	294,36	291,56	42,87	40,36	92,77	25,4	294,44	291,66	42,87	40,26	92,26	25,2
	298,76	295,50	49,20	49,98			296,23	292,68	45,34	45,72			295,42	292,52	45,60	38,88			295,37	292,54	45,67	38,84		
	298,31	296,45	45,05	50,31			296,27	295,23	41,36	45,53			298,26	295,98	41,33	37,72			298,38	296,07	41,34	37,74		
	297,70	296,47	48,45	49,38			295,74	294,17	47,67	42,23			296,43	295,31	46,61	42,85			296,50	295,23	46,60	42,85		
	298,37	295,72	48,70				295,98	293,43	44,69				296,12	293,84	42,03				296,17	293,88	42,02			

5.1	306,81	295,29	44,67	44,62	85,34	21,2	306,18	294,94	44,57	44,76	82,98	20,7	306,06	300,28	43,10	45,17	82,57	20,6	305,60	294,80	43,47	44,48	82,66	20,8
	306,65	293,05	44,49	44,65			303,81	296,07	44,87	45,04			302,81	298,60	44,91	44,65			303,33	296,56	44,07	45,03		
	303,68	300,00	44,57	44,14			300,46	298,44	43,82	45,09			301,00	296,76	44,93	44,99			300,59	298,03	44,81	44,71		
	301,58	299,85	44,74	44,50			298,87	299,98	43,30	44,75			299,31	294,99	42,63	45,12			299,66	299,44	42,49	45,40		
	304,68	297,05	44,55				302,33	297,36	44,52				302,30	297,66	44,44				302,30	297,21	44,31			
5.2	297,21	298,09	49,00	48,75	96,5	22,3	297,01	298,51	47,69	48,61	96,48	22,4	299,28	298,12	47,89	48,48	96,31	22,4	299,30	298,11	47,93	48,50	96,52	22,5
	297,14	298,84	48,11	48,85			297,67	299,40	48,35	48,61			297,95	298,09	48,32	48,91			297,91	298,14	48,21	48,91		
	297,85	298,75	47,88	49,54			297,83	298,69	47,94	49,54			297,25	298,46	47,36	48,45			297,34	298,67	47,56	48,55		
	299,17	299,57	48,50	48,30			299,12	298,70	48,89	48,26			297,25	298,97	47,97	48,68			297,35	298,88	47,89	48,73		
	297,84	298,81	48,62				297,91	298,83	48,49				297,93	298,41	48,26				297,98	298,45	48,29			
5.3	287,08	290,61	42,43	42,51	95,86	26,5	298,30	299,56	47,51	47,91	95,81	22,3	299,39	298,72	47,71	48,40	95,67	22,2	299,41	298,55	47,70	48,49	95,83	22,3
	289,00	293,03	44,03	43,63			297,76	300,30	47,75	48,60			299,01	299,22	47,94	48,48			299,06	299,37	47,85	48,53		
	289,23	297,74	40,66	42,71			299,59	299,38	47,43	48,46			297,72	300,66	47,57	48,17			297,65	300,58	47,64	48,24		
	289,90	294,94	41,56	42,61			298,00	300,48	48,13	48,55			297,47	299,57	48,51	48,33			297,48	299,43	48,47	48,49		
	288,80	294,08	42,52				298,41	299,93	48,04				298,40	299,54	48,14				298,40	299,48	48,18			
5.4	297,07	297,34	48,04	48,31	96,6	22,4	296,39	297,49	48,77	48,70	96,48	22,3	296,77	297,56	48,79	48,77	96,49	22,3	296,82	297,56	48,83	48,75	96,55	22,4
	296,62	299,63	48,58	48,61			297,23	299,90	47,93	48,71			297,35	299,67	47,95	47,62			297,40	298,85	47,96	47,63		
	296,96	299,70	48,52	48,34			296,90	299,63	48,82	48,29			298,61	299,53	48,84	48,26			298,77	299,63	48,51	48,32		
	298,51	300,71	49,05	48,72			298,46	300,67	49,00	48,73			298,55	298,88	49,12	48,65			298,63	298,67	49,13	48,73		
	297,29	299,35	48,52				297,25	299,42	48,62				297,82	298,91	48,50				297,91	298,68	48,48			
8.1	297,26	298,65	46,35	50,63	105,1	24,0	294,43	301,48	46,50	47,99	103,9	25,1	294,31	300,27	44,83	45,68	103,41	25,5	294,16	300,68	45,61	43,53	103,24	25,6
	297,82	296,95	47,87	49,71			296,24	298,28	46,16	47,77			295,99	297,91	47,76	45,50			296,15	299,82	48,06	44,87		
	301,10	297,98	49,67	48,87			296,99	297,39	47,98	44,79			296,97	296,91	47,85	45,60			295,96	297,46	47,51	44,46		
	296,61	298,24	50,57	50,82			298,30	293,68	47,57	45,96			297,37	293,67	47,47	44,09			296,61	293,76	46,54	45,25		
	298,20	297,96	49,31				296,49	297,71	46,84				296,16	297,19	46,10				295,72	297,93	45,73			
8.2	299,25	298,81	51,58	50,08	113,54	25,4	296,08	297,45	47,18	45,79	110,92	26,3	295,08	297,94	49,03	45,75	110,37	26,5	285,85	297,80	48,38	44,18	110,22	27,2
	301,40	297,70	48,85	50,61			296,02	300,98	45,77	48,10			295,14	302,23	46,53	44,79			295,41	299,99	46,68	44,05		
	297,46	298,31	48,99	50,84			297,11	301,65	47,59	48,75			296,07	301,56	47,68	45,63			295,99	302,75	46,26	43,55		
	301,60	297,17	48,35	50,84			298,15	297,37	47,61	48,43			297,74	298,43	49,38	46,63			297,34	298,33	50,26	44,73		
	299,93	298,00	50,02				296,84	299,36	47,40				296,01	300,04	46,93				293,65	299,72	46,01			
8.3	294,67	296,50	46,39	48,78	107	25,3	293,49	295,49	44,55	48,01	105,83	26,4	294,73	296,83	44,74	44,24	105,04	26,3	294,63	296,88	44,75	44,24	104,8	26,4
	295,61	297,85	47,12	47,85			294,95	297,15	44,39	45,09			296,03	298,87	42,50	43,61			296,22	298,74	42,50	43,61		
	296,87	298,60	48,04	47,83			296,29	297,85	45,93	46,54			293,52	297,67	45,80	47,95			293,48	297,70	42,80	47,91		
	298,60	298,67	48,67	48,60			297,63	299,30	46,97	43,70			297,75	295,51	46,93	48,03			297,85	295,56	46,94	48,12		
	296,44	297,91	47,91				295,59	297,45	45,65				295,51	297,22	45,48				295,55	297,22	45,11			
8.4	296,74	298,37	47,19	48,32	103,78	24,4	293,70	292,58	45,62	47,60	102,16	25,2	295,05	294,98	45,16	45,23	101,71	25,2	295,10	294,93	45,23	45,37	101,64	25,2
	296,00	299,24	47,11	47,80			295,77	294,61	45,97	45,53			296,11	295,95	46,08	45,07			296,13	296,00	46,11	45,13		
	297,07	298,71	49,04	48,76			296,04	295,89	47,34	45,34			296,00	292,78	46,74	47,56			295,99	292,76	46,75	47,62		
	297,27	295,59	47,80	48,78			297,02	296,01	47,28	46,94			296,96	295,70	47,28	46,91			296,84	295,76	47,33	46,87		
	296,77	297,98	48,10				295,63	294,77	46,45				296,03	294,85	46,25				296,02	294,86	46,30			

9.1	301,24	302,74	52,62	52,18	104,31	22,2	299,58	296,09	43,16	50,79	101,07	23,2	298,79	299,12	47,48	52,58	100,9	22,9	298,51	299,15	50,99	48,36	100,81	22,9
	301,89	300,39	50,80	52,18			293,98	297,99	46,40	50,40			293,51	299,95	47,65	50,51			296,50	299,41	51,71	51,45		
	302,01	300,71	52,27	52,57			290,87	299,50	51,94	51,86			296,54	297,16	51,36	47,68			295,08	298,74	47,54	51,51		
	300,89	299,88	50,45	51,58			295,17	297,64	50,64	52,14			295,23	297,55	51,34	49,90			294,32	297,12	48,42	48,33		
	301,51	300,93	51,83				294,90	297,81	49,67				296,02	298,45	49,81				296,10	298,61	49,79			
9.2	296,74	296,00	43,55	49,69	106,58	26,3	295,85	296,52	49,39	49,72	105,75	25,9	296,09	297,41	49,70	49,86	105,64	24,8	297,25	296,80	50,16	48,78	105,16	24,6
	295,65	294,88	48,71	50,06			294,92	296,18	46,10	50,24			296,48	297,08	45,62	45,71			295,19	296,75	49,75	49,39		
	294,66	290,47	49,04	48,96			289,48	296,61	44,81	43,48			293,18	297,64	49,20	48,48			294,34	296,97	47,59	50,71		
	295,64	287,10	42,55	43,45			293,64	295,75	47,84	44,00			292,07	297,67	49,87	50,33			293,15	296,58	46,44	48,33		
	295,67	292,11	47,00				293,47	296,27	46,95				294,46	297,45	48,60				294,98	296,78	48,89			
9.3	293,90	295,92	46,61	49,24	100,31	24,2	296,85	291,57	43,41	49,21	98,87	25,3	284,81	291,79	48,51	42,81	98,7	25,2	296,50	291,74	49,47	43,22	98,41	24,4
	294,36	296,56	47,27	49,46			292,29	293,33	43,55	48,06			288,01	292,14	48,30	42,30			294,55	292,84	48,97	47,33		
	291,96	297,17	46,98	49,07			282,77	295,29	48,73	41,72			293,71	293,42	44,20	49,18			289,68	293,80	44,42	49,22		
	292,05	295,18	44,06	49,56			291,34	294,76	48,43	42,17			297,15	295,69	43,30	48,39			286,72	294,79	44,62	49,77		
	293,07	296,21	47,78				290,81	293,74	45,66				290,92	293,26	45,87				291,86	293,29	47,13			
9.4	298,89	296,86	49,50	50,60	106,21	23,7	297,41	298,67	50,01	46,43	103,71	24,3	297,59	298,09	49,63	49,14	103,6	24,1	296,57	297,03	49,63	48,26	103,05	23,8
	299,15	295,35	52,20	51,24			294,60	297,41	49,70	49,76			294,67	297,21	50,45	46,59			294,99	297,54	49,73	50,72		
	300,22	296,39	48,57	52,40			291,41	295,39	46,68	50,63			293,95	297,30	47,64	51,20			294,69	298,59	47,79	49,54		
	299,55	296,61	48,08	51,40			295,72	295,11	46,81	51,04			292,18	295,74	47,38	51,23			294,32	298,50	47,61	50,57		
	299,45	296,30	50,50				294,79	296,65	48,88				294,60	297,09	49,16				295,14	297,92	49,23			
10.1	297,62	298,00	48,31	48,57	95,62	22,0	297,80	297,94	48,79	48,62	94,53	21,8	297,61	297,61	48,46	48,24	94,46	22,0	297,65	299,22	47,49	48,55	94,55	22,0
	298,13	299,60	48,92	48,76			297,51	299,29	49,53	48,46			297,44	298,66	49,02	47,77			296,45	298,88	48,16	48,61		
	298,30	300,28	49,35	48,63			297,15	299,60	48,67	48,71			297,25	299,81	48,17	48,69			297,26	299,77	47,70	47,72		
	298,56	298,38	48,56	48,55			298,50	298,29	48,69	48,67			298,42	298,43	47,92	48,73			298,40	298,36	48,79	48,71		
	298,15	299,07	48,71				297,74	298,78	48,77				297,68	298,63	48,38				297,44	299,06	48,22			
10.2	297,54	299,58	49,30	48,11	100,66	23,2	297,71	298,84	48,92	48,09	100,38	23,2	297,60	299,08	47,93	49,19	100,57	23,3	297,70	298,74	47,95	49,26	100,42	23,3
	297,06	299,05	48,85	49,29			296,84	299,68	49,27	48,99			296,70	298,67	48,68	49,19			296,75	298,60	48,60	49,21		
	296,92	297,80	49,18	48,88			297,40	298,41	48,90	48,38			297,38	298,41	48,03	48,35			297,45	298,49	48,16	48,40		
	298,14	298,07	49,01	48,45			297,78	298,35	48,59	48,23			297,80	298,20	48,45	48,27			297,68	298,34	48,50	48,37		
	297,42	298,63	48,88				297,43	298,82	48,67				297,37	298,59	48,51				297,40	298,54	48,56			
10.3	297,11	278,46	48,51	48,05	99,22	24,8	296,80	277,89	48,13	48,00	98,62	24,8	296,81	277,78	48,10	47,98	98,57	24,8	296,80	277,80	48,12	48,01	98,54	24,7
	296,52	278,12	48,36	48,20			296,55	278,79	48,29	48,07			296,48	278,70	48,32	48,00			296,51	278,75	48,36	47,87		
	297,81	276,70	48,87	48,01			297,15	277,36	48,55	48,01			297,09	277,36	48,46	48,00			297,09	277,42	48,53	48,12		
	298,36	276,90	48,89	48,30			298,19	276,50	48,84	48,30			298,20	276,43	48,81	48,30			298,18	276,50	48,82	48,30		
	297,45	277,55	48,40				297,17	277,64	48,27				297,15	277,57	48,25				297,15	277,62	48,27			
10.4	296,66	297,32	48,66	48,66	105,42	24,5	296,58	297,59	47,47	48,30	105	24,7	297,40	296,70	48,76	48,98	105,02	24,4	297,40	296,82	48,80	48,86	104,95	24,4
	298,16	295,81	48,33	48,85			297,31	295,35	48,25	48,34			298,32	296,58	48,23	48,90			298,40	296,74	48,35	48,95		
	298,54	296,44	49,13	48,93			298,36	296,26	48,07	48,30			296,60	297,50	48,49	48,40			296,53	297,64	48,52	48,41		
	299,80	295,55	48,88	48,68			299,44	295,99	48,01	48,35			299,42	296,02	48,61	48,39			299,61	296,41	48,46	48,40		
	298,29	296,28	48,76				297,92	296,30	48,14				297,94	296,70	48,59				297,99	296,90	48,59			

11.1	298,77	298,66	47,68	48,02	95,11	22,2	297,84	298,65	48,53	48,35	90,52	21,2	297,51	298,39	49,36	48,47	90	20,9	297,90	298,62	48,02	48,53	89,64	20,9
	298,62	296,62	48,70	48,25			296,99	297,54	48,18	48,72			296,15	298,19	49,92	48,72			298,63	298,38	48,39	48,96		
	297,71	295,25	47,38	49,33			295,46	297,89	47,72	47,48			296,64	298,20	48,59	48,99			296,16	298,24	47,61	48,28		
	296,12	297,15	48,69	48,92			297,01	295,52	49,47	48,75			296,88	295,66	47,97	47,76			297,29	296,37	48,78	48,05		
	297,81	296,92	48,37				296,83	297,40	48,40				296,80	297,61	48,72				297,50	297,90	48,33			
11.2	300,02	299,88	49,28	48,76	104,16	23,7	297,13	298,78	49,36	48,59	102,36	23,5	297,27	298,80	48,77	48,57	102,3	23,6	297,36	298,72	48,85	48,60	102,31	23,6
	299,16	299,48	49,71	48,72			297,60	298,55	49,67	48,66			299,33	298,44	48,43	48,71			299,35	298,56	48,39	48,76		
	297,88	299,85	48,95	48,98			298,61	298,33	48,71	48,82			298,57	298,27	48,54	48,80			298,43	298,36	48,50	48,69		
	297,50	300,11	49,35	49,12			299,94	298,16	49,17	48,78			299,89	298,15	49,15	48,76			299,62	298,11	49,20	48,81		
	298,64	299,83	49,11				298,32	298,46	48,97				298,77	298,42	48,72				298,69	298,44	48,73			
11.3	300,72	299,39	49,13	48,62	87,72	20,0	299,77	298,82	49,33	48,73	85,75	19,6	299,68	299,26	47,84	48,64	85,7	19,7	299,60	299,30	47,52	48,73	85,72	19,7
	299,29	300,42	49,04	48,88			298,64	301,35	49,01	48,95			298,01	299,13	48,59	48,58			298,00	299,10	48,71	48,60		
	298,31	300,85	48,54	49,04			298,37	299,98	47,91	49,12			298,35	299,94	49,12	49,10			298,43	299,89	49,10	49,14		
	298,14	299,30	49,43	48,83			298,02	298,27	48,71	48,73			298,00	298,24	48,57	48,69			298,15	298,20	48,64	48,73		
	299,12	299,99	48,94				298,70	299,61	48,81				298,51	299,14	48,64				298,55	299,12	48,65			
11.4	298,48	298,72	49,15	48,84	97,59	22,3	298,45	297,83	48,74	48,83	95,31	21,9	297,43	298,36	48,78	47,60	95,2	22,3	297,31	298,37	48,65	47,55	95,01	22,2
	298,14	299,64	49,91	48,31			298,01	299,59	49,44	48,78			298,05	298,93	47,97	47,54			298,15	298,81	47,87	47,59		
	298,57	299,08	49,37	49,27			297,75	298,78	49,04	48,82			297,71	299,56	47,81	48,54			297,65	299,42	47,90	48,47		
	299,35	298,68	48,77	48,22			298,75	298,83	48,21	49,07			298,72	297,82	47,01	48,87			298,80	297,90	47,08	48,91		
	298,64	299,03	48,98				298,24	298,76	48,87				297,98	298,67	48,02				297,98	298,63	48,00			

Příloha 5 – naměřené hodnoty při 10 % deformaci tepelně technických výrobků

1.4			1.5			2.3			3.2		
d ₀	48,15	mm	d ₀	51,78	mm	d ₀	47,20	mm	d ₀	45,15	mm
ρ	27,6	kg.m ⁻³	ρ	27,6	kg.m ⁻³	ρ	27,6	kg.m ⁻³	ρ	31,5	kg.m ⁻³
x10	4,815	mm	x10	5,178	mm	x10	4,72	mm	x10	4,515	mm
A	0,0395	m ²	A	0,0396	m ²	A	0,0404	m ²	A	0,0396	m ²
deformace [mm]	F [kN]		deformace [mm]	F [kN]		deformace [mm]	F [kN]		deformace [mm]	F [kN]	
0,00	0,00		0,00	0,00		0,07	0,00		0,00	0,00	
0,09	0,05		0,09	0,05		0,41	0,05		0,43	0,05	
0,46	0,10		0,55	0,10		0,69	0,10		1,20	0,10	
0,89	0,15		0,90	0,15		0,89	0,15		1,59	0,15	
1,09	0,20		1,39	0,20		1,06	0,20		1,89	0,20	
1,65	0,25		1,86	0,25		1,19	0,25		2,02	0,25	
2,03	0,30		2,35	0,30		1,34	0,30		2,26	0,30	
2,37	0,35		2,67	0,35		1,53	0,35		2,45	0,35	
2,64	0,40		2,99	0,40		1,64	0,40		2,67	0,40	
2,89	0,45		3,30	0,45		1,82	0,45		2,81	0,45	
3,23	0,50		3,23	0,50		1,93	0,50		3,01	0,50	
3,50	0,55		3,50	0,55		2,05	0,55		3,14	0,55	
3,83	0,60		3,59	0,60		2,20	0,60		3,42	0,60	
4,09	0,65		3,84	0,65		2,31	0,65		3,61	0,65	
4,34	0,70		4,38	0,70		2,42	0,70		3,74	0,70	
4,59	0,75		4,67	0,75		2,52	0,75		4,01	0,75	
4,84	0,80		4,96	0,80		2,63	0,80		4,20	0,80	
5,16	0,85		5,13	0,85		2,72	0,85		4,45	0,85	
5,26	0,90		5,41	0,90		2,83	0,90		4,65	0,90	
5,36	0,95		5,68	0,95		2,92	0,95		4,93	0,95	
5,40	1,00		5,95	1,00		3,01	1,00		5,07	1,00	
5,70	1,05		6,30	1,05		3,11	1,05		5,30	1,05	
5,78	1,10		6,57	1,10		3,14	1,10		5,55	1,10	
5,97	1,15		6,82	1,15		3,23	1,15		5,71	1,15	
6,19	1,20		7,15	1,20		3,34	1,20		5,96	1,20	
6,49	1,25		7,33	1,25		3,42	1,25		6,20	1,25	
6,72	1,30		7,65	1,30		3,52	1,30		6,44	1,30	
6,97	1,35		7,81	1,35		3,67	1,35		6,69	1,35	
7,20	1,40		8,13	1,40		3,79	1,40		6,92	1,40	
7,53	1,45		8,35	1,45		3,91	1,45		7,14	1,45	
8,15	1,50		8,66	1,50		4,21	1,50		7,30	1,50	
-	-		-	-		4,29	1,55		-	-	
-	-		-	-		4,45	1,60		-	-	
-	-		-	-		4,58	1,65		-	-	
-	-		-	-		4,78	1,70		-	-	
-	-		-	-		5,04	1,75		-	-	

-	-	-	-	5,24	1,80	-	-
-	-	-	-	5,42	1,85	-	-
-	-	-	-	5,62	1,90	-	-
-	-	-	-	5,83	1,95	-	-
-	-	-	-	5,98	2,00	-	-

3.3			4.3			4.4			5.2		
d ₀	46,48	mm	d ₀	38,34	mm	d ₀	41,01	mm	d ₀	48,18	mm
ρ	31	kg.m ⁻³	ρ	36,3	kg.m ⁻³	ρ	25,2	kg.m ⁻³	ρ	22,4	kg.m ⁻³
x10	4,648	mm	x10	3,834	mm	x10	4,101	mm	x10	4,818	mm
A	0,0400	m ²	A	0,0395	m ²	A	0,0396	m ²	A	0,0406	m ²
deformace [mm]	F [kN]		deformace [mm]	F [kN]		deformace [mm]	F [kN]		deformace [mm]	F [kN]	
0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00		0	0,00	
0,06	0,05		0,54	0,05		0,32	0,05		0,07	0,05	
0,2	0,10		0,79	0,10		0,71	0,10		0,55	0,10	
0,28	0,15		1,34	0,15		1,11	0,15		0,9	0,15	
0,5	0,20		2,12	0,20		1,62	0,20		1,09	0,20	
0,63	0,25		2,68	0,25		1,88	0,25		1,37	0,25	
0,82	0,30		3,29	0,30		2,26	0,30		1,52	0,30	
0,99	0,35		3,73	0,35		2,64	0,35		1,7	0,35	
1,13	0,40		4,2	0,40		2,88	0,40		1,87	0,40	
1,24	0,45		4,63	0,45		3,10	0,45		2,07	0,45	
1,46	0,50		5,09	0,50		3,37	0,50		2,26	0,50	
1,64	0,55		5,37	0,55		3,74	0,55		2,46	0,55	
1,95	0,60		5,82	0,60		4,11	0,60		2,72	0,60	
2,13	0,65		6,25	0,65		4,35	0,65		2,99	0,65	
2,37	0,70		6,54	0,70		4,60	0,70		3,34	0,70	
2,66	0,75		6,82	0,75		5,08	0,75		3,68	0,75	
2,96	0,80		7,1	0,80		5,46	0,80		4,19	0,80	
3,16	0,85		7,38	0,85		5,69	0,85		4,85	0,85	
3,42	0,90		-	-		6,17	0,90		5,02	0,90	
3,74	0,95		-	-		6,51	0,95		5,51	0,95	
3,91	1,00		-	-		6,87	1,00		5,97	1,00	
4,24	1,05		-	-		7,11	1,05		6,3	1,05	
4,59	1,10		-	-		7,46	1,10		6,85	1,10	
4,94	1,15		-	-		-	-		7,01	1,15	
-	-		-	-		-	-		7,37	1,20	

5.4			8.2			8.4			9.1		
d ₀	47,91	mm	d ₀	45,82	mm	d ₀	45,53	mm	d ₀	50,08	mm
ρ	22,3	kg.m ⁻³	ρ	27,2	kg.m ⁻³	ρ	25,2	kg.m ⁻³	ρ	22,3	kg.m ⁻³
x10	4,791	mm	x10	4,582	mm	x10	4,553	mm	x10	5,008	mm
A	0,0395	m ²	A	0,0398	m ²	A	0,0400	m ²	A	0,0402	m ²
deformace [mm]	F [kN]		deformace [mm]	F [kN]		deformace [mm]	F [kN]		deformace [mm]	F [kN]	
0	0,00		0	0,00		0	0,00		0	0,00	
0	0,05		0,1	0,05		1,22	0,05		0,3	0,05	
0	0,10		0,35	0,10		1,5	0,10		0,44	0,10	
0,17	0,15		0,51	0,15		1,78	0,15		0,58	0,15	
0,41	0,20		0,84	0,20		1,99	0,20		0,72	0,20	
0,54	0,25		1,08	0,25		2,19	0,25		0,94	0,25	
0,78	0,30		1,63	0,30		2,35	0,30		1,08	0,30	
0,89	0,35		2,46	0,35		2,54	0,35		1,28	0,35	
1,11	0,40		2,99	0,40		2,72	0,40		1,42	0,40	
1,29	0,45		3,25	0,45		2,9	0,45		1,95	0,45	
1,44	0,50		3,68	0,50		3,06	0,50		2,19	0,50	
1,58	0,55		3,98	0,55		3,19	0,55		2,41	0,55	
1,8	0,60		4,23	0,60		3,35	0,60		2,58	0,60	
2,08	0,65		4,41	0,65		3,51	0,65		2,75	0,65	
2,22	0,70		4,59	0,70		3,65	0,70		2,93	0,70	
2,55	0,75		4,74	0,75		3,81	0,75		3,12	0,75	
2,83	0,80		4,98	0,80		3,94	0,80		3,38	0,80	
3,2	0,85		5,06	0,85		4,05	0,85		3,56	0,85	
3,49	0,90		5,2	0,90		4,22	0,90		3,83	0,90	
4,16	0,95		5,43	0,95		4,32	0,95		4,02	0,95	
4,73	1,00		5,56	1,00		4,48	1,00		4,29	1,00	
5,48	1,05		5,69	1,05		4,6	1,05		4,56	1,05	
6,35	1,10		5,83	1,10		4,75	1,10		4,83	1,10	
7,2	1,15		6,03	1,15		4,96	1,15		5,09	1,15	
8,37	1,20		6,22	1,20		5,12	1,20		5,46	1,20	
-	-		6,41	1,25		5,2	1,25		5,71	1,25	
-	-		6,53	1,30		5,41	1,30		5,97	1,30	
-	-		6,74	1,35		5,61	1,35		6,32	1,35	
-	-		6,93	1,40		-	-		6,58	1,40	
-	-		7,12	1,45		-	-		-	-	
-	-		7,46	1,50		-	-		-	-	

9.2			10.3			10.4			11.1			11.4		
d ₀	47,67	mm	d ₀	48,08	mm	d ₀	48,51	mm	d ₀	47,92	mm	d ₀	48,37	mm
ρ	24,8	kg.m ⁻³	ρ	24,8	kg.m ⁻³	ρ	24,8	kg.m ⁻³	ρ	20,9	kg.m ⁻³	ρ	23,6	kg.m ⁻³
x10	4,767	mm	x10	4,808	mm	x10	4,851	mm	x10	4,792	mm	x10	4,837	mm
A	0,0397	m ²	A	0,0394	m ²	A	0,0391	m ²	A	0,0397	m ²	A	0,0402	m ²
deformace [mm]	F [kN]		deformace [mm]	F [kN]		deformace [mm]	F [kN]		deformace [mm]	F [kN]		deformace [mm]	F [kN]	
0	0,00		0	0,00		0	0,00		0,05	0,00		0	0,00	
0,07	0,05		0,06	0,05		0	0,05		0,23	0,05		0	0,05	
0,26	0,10		0,24	0,10		0	0,10		0,44	0,10		0,02	0,10	
0,48	0,15		0,46	0,15		0,07	0,15		0,58	0,15		0,17	0,15	
0,71	0,20		1,05	0,20		0,18	0,20		0,72	0,20		0,33	0,20	
0,94	0,25		1,14	0,25		0,76	0,25		0,87	0,25		0,44	0,25	
1,09	0,30		1,21	0,30		0,91	0,30		1,05	0,30		0,51	0,30	
1,31	0,35		1,36	0,35		0,98	0,35		1,16	0,35		0,62	0,35	
1,54	0,40		1,55	0,40		1,11	0,40		1,29	0,40		0,71	0,40	
1,67	0,45		1,75	0,45		1,24	0,45		1,46	0,45		0,82	0,45	
1,95	0,50		1,93	0,50		1,37	0,50		1,59	0,50		0,91	0,50	
2,17	0,55		2,02	0,55		1,57	0,55		1,71	0,55		1,03	0,55	
2,36	0,60		2,2	0,60		1,7	0,60		1,87	0,60		1,11	0,60	
2,57	0,65		2,47	0,65		1,96	0,65		2,04	0,65		1,24	0,65	
2,68	0,70		2,64	0,70		2,13	0,70		2,22	0,70		1,39	0,70	
2,97	0,75		2,89	0,75		2,31	0,75		2,38	0,75		1,5	0,75	
3,2	0,80		3,25	0,80		2,67	0,80		2,53	0,80		1,66	0,80	
3,6	0,85		3,61	0,85		3,03	0,85		2,75	0,85		1,84	0,85	
3,82	0,90		4,01	0,90		3,23	0,90		2,91	0,90		1,99	0,90	
4,11	0,95		4,46	0,95		3,76	0,95		3,12	0,95		2,13	0,95	
4,24	1,00		4,71	1,00		4,17	1,00		3,39	1,00		2,28	1,00	
4,58	1,05		5,07	1,05		4,7	1,05		3,5	1,05		2,62	1,05	
4,76	1,10		5,31	1,10		5,28	1,10		3,85	1,10		2,74	1,10	
5,03	1,15		6,06	1,15		6,15	1,15		4,06	1,15		2,98	1,15	
5,26	1,20		6,53	1,20		7,17	1,20		4,29	1,20		3,32	1,20	
5,48	1,25		7,1	1,25		7,88	1,25		4,59	1,25		3,72	1,25	
5,71	1,30		7,43	1,30		8,82	1,30		4,89	1,30		4,07	1,30	
5,88	1,35		7,86	1,35		9,24	1,35		5,13	1,35		4,29	1,35	
-	-		8,12	1,40		9,75	1,40		5,39	1,40		4,7	1,40	
-	-		-	-		-	-		5,85	1,45		5,03	1,45	
-	-		-	-		-	-		6,89	1,50		5,35	1,50	
-	-		-	-		-	-		6,34	1,55		5,77	1,55	
-	-		-	-		-	-		6,81	1,60		6,09	1,60	
-	-		-	-		-	-		-	-		6,54	1,65	
-	-		-	-		-	-		-	-		7,14	1,70	
-	-		-	-		-	-		-	-		7,61	1,75	